



# *DEDICACE*

*Je dédie ce modeste travail*

- ✓ *A mes très chers parents pour leur amour, leur soutien morale et leur encouragement.*
- ✓ *A M<sup>r</sup>. L. Djemili le directeur de ce mémoire.*
- ✓ *A mon Marie*
- ✓ *A mes enfants Abdelmoumen et khadija*
- ✓ *A ma sœur et mon frère*
- ✓ *A tous mes enseignants et collègues de tous les cycles.*

***B. Zoulikha***

# *REMERCIEMENTS*

Mes remerciements et ma gratitude sont destinés : à Dieu qui m'a permis de réussir et de poursuivre le chemin de savoir.

Ainsi qu'à Monsieur L. Djemili qui a fait honneur à son engagement par : ses conseils, ses remarques précieuses, sa documentation, sa patience et sa sincérité qui m'ont aidé d'arriver à ce travail.

J'adresse aussi mes vifs remerciements à Mr H. Amarchi professeur au département d'Hydraulique d'avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie également Mr Zeghadnia Lotfi maître de conférences Université, Souk-Ahras, Mr Heddami Salim maître de conférences Université Skikda, d'avoir pris le soin d'examiner ce travail et me faire l'honneur de participer au jury.

Je tiens aussi à adresser mes remerciements au chef département de Génie Civil, Mr M. Bihime ainsi que M<sup>me</sup> Chelghoum et tous les responsables du laboratoire de mécanique des soles au département de Génie Civil.

J'adresse aussi mes vifs remerciements au directeur technique et le groupe de techniciens du produit noir du laboratoire des travaux publics Est Annaba (**L.T.P.EST ANNABA**), qui ont apporté une aide efficace.

Enfin, je remercie énormément tous ceux qui ont participé de près ou de loin et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

*MERCI*

## TABLE DES MATIERES

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	x
Liste des abréviations.....	xii
Résumé.....	xiv
Abstract.....	xv
ملخص.....	xvi
Introduction général.....	1
<b>Chapitre 1 L'utilisation du béton bitumineux dans le domaine d'hydraulique</b>	
1.1 Définitions .....	4
1.1.1 Le bitume .....	4
1.1.2 Le béton bitumineux .....	5
1.2 Historique .....	6
1.3 Différents types du béton bitumineux .....	8
1.4 Application des bétons bitumineux .....	8
1.4.1 Dans le domaine de construction et travaux publique .....	8
1.4.2 Dans le domaine d'hydraulique .....	8
1.4.2.1 Comme une application superficielle .....	9
1.4.2.2 Comme un revêtement et cuvelage .....	9
1.4.2.3 Comme une étanchéité des barrages .....	9
1.5 Conclusion .....	10
<b>Chapitre 2 Étanchéité des barrages en remblai</b>	
2.1 Généralité .....	11
2.2 Les différents types des barrages .....	11
2.2.1 Les barrages en béton .....	12
2.2.1.1 Barrages poids .....	12
2.2.1.2 Barrages voutes .....	12
2.2.1.3 Barrages à contreforts .....	13
2.2.2 Les barrages en remblai .....	13
2.2.2.1 Barrage en terre .....	14
2.2.2.1.1 Barrage homogène .....	14
2.2.2.1.2 Barrages à noyaux .....	15
2.2.2.2 Barrage en enrochement .....	16
2.3 Étanchéité du barrage en remblai .....	17
2.3.1 Notion de l'eau dans le sol .....	17
2.3.2 Circulation de l'eau dans le sol .....	17
2.3.3 Les infiltrations dans les barrages en remblai .....	17
2.3.4 Stabilité hydraulique .....	17
2.3.5 Choix du système d'étanchéité .....	18
2.3.6 Différents types d'organes d'étanchéité .....	19
2.3.6.1 Noyaux .....	19
2.3.6.1.1 Noyau argileux compacté .....	19

2.3.6.1.2 Noyau bitumineux .....	20
2.3.6.2 Masque amont .....	20
2.3.6.2.1 Masque amont en béton de ciment .....	20
2.3.6.2.2 Masque amont en béton armé .....	21
2.3.6.2.3 Masque amont en acier .....	21
2.3.6.2.4 Masque amont en terre .....	22
2.3.6.2.5 Masques amont en béton bitumineux .....	22
2.3.6.2.6 Masque en membrane souple .....	22
2.3.6.3 Étanchéité des fondations des barrages .....	23
2.3.6.3.1 Clé d'étanchéités .....	24
2.3.6.3.2 Paroi moulée .....	24
2.3.6.3.3 Traitement des fondations par injection .....	24
2.3.6.3.4 Tapis d'étanchéité amont .....	25
2.3.7 Dispositions de drainage .....	25
2.3.7.1 Les drains .....	25
2.3.7.2 Les filtres .....	26
2.4 Conclusion.....	27

### **Chapitre 3 : Étanchéité par le masque en béton bitumineux**

3.1 Généralité .....	28
3.2 Évolution des masques en béton bitumineux .....	29
3.3 Constitution des bétons bitumineux .....	31
3.3.1 L'étanchéité .....	31
3.3.2 Les caractéristiques mécaniques .....	31
3.4 Exécution des revêtements bitumineux .....	31
3.5 La couche imperméable .....	32
3.6 Rôle du masque étanche .....	33
3.7 Caractéristiques mécaniques et physiques du masque étanche .....	33
3.8 Comportement du masque étanche .....	33
3.8.1 Problèmes structuraux .....	34
3.8.2 Problèmes relatifs au bitume .....	34
3.8.3 Problèmes de vieillissement .....	34
3.9 Conclusion .....	36

### **Chapitre 4 : l'expérience Algérienne dans l'utilisation des masques en béton bitumineux**

4.1 Introduction .....	37
4.2 L'expérience Algérienne .....	37
4.2.1 Barrage Ghrib .....	37
4.2.2 Barrage Oued Sarno .....	38
4.2.3 Barrage Ighil Emda .....	38
4.2.4 Barrage Bouhanifia .....	39
4.3 Comportement des masques étanche des barrages algériens .....	43
4.3.1 Barrage Ghrib .....	43
4.3.2 Barrage Sarno .....	43
4.3.3 Barrage Bouhanifia .....	43
4.4 Conclusion .....	45

## **Chapitre 5 : Etude de comportement du masque du barrage Bouhnifia (Algérie) en absence de la protection thermique.**

5.1 Introduction .....	46
5.2. Généralité sur les matériaux utilisés .....	46
5.2.1 Les granulats .....	46
5.2.2 Le bitume .....	47
5.2.2.1 Les essais technologiques .....	47
5.2.2.2 Les essais rhéologiques .....	49
5.2.3 Liaison bitume – granulat .....	49
5.2.4 Structure des enrobés bitumineux .....	49
5.3 Étude expérimentale .....	50
5.3.1 Méthodologie générale .....	50
5.3.2 Méthode Marshall (NQ 2300-060).....	50
5.3.2.1 Principes de la méthode Marshall .....	51
5.3.2.2 Le meilleur enrobé suivant la méthode de Marshall .....	51
5.3.3 Préparation du mélange et confection des éprouvettes .....	51
5.3.3.1 Détermination des caractéristiques des agrégats .....	52
5.3.3.2 Détermination des caractéristiques bitume .....	57
5.3.3.3 Confection des éprouvettes .....	57
5.3.3.4 Détermination des propriétés des mélanges bitumineux « éprouvette ».....	59
5.3.3.4.1 Résistance à la compression .....	63
5.3.3.4.2 Pourcentage d'imbibition .....	64
5.3.3.4.3 Pourcentage de gonflement .....	65
5.3.3.4.4 Stabilité suivant Marshall après immersion pendant 14 et 28 jours .....	66
5.3.3.4.5 Perméabilité .....	67
5.3.3.4.6 Vérification de la stabilité sur talus .....	68
5.3.4 Interprétation des résultats .....	69
5.4 Conclusion .....	69

## **Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

6.1 Introduction .....	70
6.2. Généralité sur le filler .....	70
6.3 Étude expérimentale .....	71
6.3.1 Analyse granulométriques .....	71
6.3.2 Confection des éprouvettes .....	77
6.3.3 Détermination des propriétés des mélanges bitumineux .....	77
6.4 Interprétation des résultats .....	93
6.5 Conclusion .....	93

## **Chapitre 7 : Etude théorique sur l'amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux par les polymères**

7.1 Introduction .....	98
7.2. Historiques .....	98
7.3 Définition des polymères .....	98
7.4 Différents types de polymères utilisés pour la modification des enrobés .....	98
7.4.1 Polymères thermoplastiques .....	99

7.4.2 Caoutchoucs naturels et synthétiques .....	99
7.4.3 Caoutchoucs thermoplastiques .....	99
7.4.4 Polymères thermodurcissables .....	100
7.5 Bitume polymère .....	100
7.5.1 Compatibilité des bitumes et des polymères .....	100
7.5.2 Comptabilité – Solubilité .....	100
7.5.3 Compatibilité – Convenance .....	101
7.5.4 Les liants modifiés .....	102
7.5.4.1 Les liants modifiés élastomères .....	103
7.5.4.2 Les liants modifiés plastomères .....	104
7.5.4.3 Modification des bitumes par d'autres polymères et des mélanges d'élastomères et de plastomères .....	105
7.6 conclusion .....	105
<b>Conclusion Générale &amp; Recommandations .....</b>	<b>107</b>
 <b>Annexes</b>	
<b>Annexe 1</b> Exemples des ouvrages réalisés avec le béton bitumineux .....	109
<b>Annexe 2</b> Exemples des barrages réalisés en béton bitumineux .....	114
 <b>Références Bibliographiques .....</b>	 117

## Liste des figures

Figure 1.1	Schéma général de la fabrication industrielle des bitumes .....	4
Figure 1.2	Composant de béton bitumineux .....	5
Figure 1.3	Gisement de bitume naturel (Lake Ashpalt Trinidad).....	6
Figure 1.4	Schéma général de la fabrication industrielle des bitumes .....	7
Figure 2.1	Coupe du barrage poids .....	12
Figure 2.2	Coupe du barrage voute .....	12
Figure 2.3	Coupe du barrage à contreforts .....	13
Figure 2.4	Différents types de barrage en remblai .....	14
Figure 2.5	Barrage en terre compactée, homogène .....	14
Figure 2.6	Barrage a noyau .....	15
Figure 2.7	Coupe d'un barrage en enrochement .....	16
Figure 2.8	Noyau en argile vertical et incliné .....	19
Figure 2.9	Coupe d'un barrage à masque amont .....	20
Figure 2.10	Masque amont en béton de ciment .....	21
Figure 2.11	Coupe du masque amont en béton armé .....	21
Figure 2.12	Masque amont en béton bitumineux .....	22
Figure 2.13	Masque amont en membrane souple .....	23
Figure 2.14	Clé d'étanchéités .....	24
Figure 2.15	Paroi moulée .....	24
Figure 2.16	Traitement des fondations par injection .....	25
Figure 2.17	Tapis d'étanchéité amont .....	25
Figure 3.1	Barrage en remblai avec un masque amont en béton bitumineux ...	28
Figure 3.2	Masque d'étanchéité type A .....	30
Figure 3.3	Masque d'étanchéité type B .....	30
Figure 4.1	Barrage Ghrib .....	38
Figure 4.2	Barrage oued Sarno .....	38
Figure 4.3	Barrage Ighil Emda .....	39
Figure 4.4	Barrage Bouhanifia .....	39
Figure 4.5	Coupe du barrage Bouhanifia.....	40
Figure 4.6	Coupe du masque étanche .....	42
Figure 4.7	Fissuration des panneaux n°26, 27 et 28 de l'avant masque.....	43
Figure 4.8	Cassure supérieur du panneau n°29 de l'avant masque au niveau de l'ancrage.....	44
Figure 4.9	Détail de la cassure du panneau n°29 de l'avant masque au niveau de l'ancrage.....	44
Figure 5.1	Mesure de pénétrabilité.....	48
Figure 5.2	Appareil de l'essai « Bille et anneau » .....	48
Figure 5.3	Appareil de Marshall.....	50
Figure 5.4	Verres gradués remplis d'eau.....	52
Figure 5.5	Remplissage des verres par l'échantillon du sable.....	52
Figure 5.6	Fuseau granulométrique recommandé.....	55
Figure 5.7	Tamissage électrique.....	55
Figure 5.8	Courbe granulométrique de l'échantillon.....	56
Figure 5.9	Malaxage du mélange.....	57
Figure 5.10	Préparation et remplissage des moules.....	58

Figure 5.11	Compactage des éprouvettes .....	58
Figure 5.12	Refroidissement des éprouvettes.....	59
Figure 5.13	Mesure des éprouvettes.....	59
Figure 5.14	Répartition des volumes dans une éprouvette de l'enrobé.....	61
Figure 5.15	Essai de compression.....	63
Figure 5.16	Des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 14 jours.....	64
Figure 5.17	Essai de Marshall.....	66
Figure 5.18	Des éprouvettes placées dans l'étuve.....	68
Figure 5.19	Des éprouvettes retirées de l'étuve. ....	68
Figure 6.1	Fuseau granulométrique recommandé.....	71
Figure 6.2	Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 5%).....	72
Figure 6.3	Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 8%).....	73
Figure 6.4	Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 10%).....	74
Figure 6.5	Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 15%).....	75
Figure 6.6	Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 20%).....	76
Figure 6.7	Variation du filler en fonction de la densité.....	82
Figure 6.8	Variation de filler en fonction du pourcentage des vides occupé par l'air.....	82
Figure 6.9	Variation du filler en fonction du pourcentage des vides des agrégats.....	83
Figure 6.10	Variation du filler en fonction de la stabilité.....	83
Figure 6.11	Variation du filler en fonction du fluage.....	84
Figure 6.12	Variation du filler en fonction de la résistance à la compression 0..	92
Figure 6.13	Variation du filler en fonction de la résistance à la compression 20°.....	92
Figure 6.14	Variation du filler en fonction de la résistance à la compression 50°.....	93
Figure 6.15	Variation du filler en fonction d'imbibition.....	93
Figure 6.16	Variation du filler en fonction de gonflement. ....	94
Figure 6.17	Variation du filler en fonction de perméabilité	94
Figure 6.18	Variation du filler en fonction de la stabilité pendant 14 et 28 jours.....	95
Figure 6.19	Variation du filler en fonction de fluage.....	95
Figure 6.20	Des éprouvettes placées dans l'étuve.....	96
Figure 6.21	Des éprouvettes gardées leur forme initiale (filler 8%).....	96
Figure 6.22	Des éprouvettes déformées (filler 15%).....	96
Figure 6.23	Des éprouvettes déformées (filler 20%).....	97
Figure 7.1	Mélanges bitume/SBS à teneur croissante de polymère.....	102
Figure 7.2	Photo de microscopie d'un mélange bitume modifié élastomères. ...	104
Figure 7.3	Microstructure d'un bitume plastomère à matrice bitume continue....	104
Figure 7.4	Microstructure d'un bitume plastomère à matrice polymère continue	104
Figure 7.5	Microstructure d'un bitume plastomère à matrice mixte.....	104

## Figures des annexes

Figure A2.1	Barrage de Matemale .....	114
Figure A2.2	Barrage de Grand'Maison (France).....	114
Figure A2.3	Barrages de Gréziolles .....	114
Figure A2.4	Barrage de Monnes .....	114
Figure A2.5	Barrage de l'Ortolo (Haute Corse).....	116

## Liste des tableaux

Tableau 5.1	Classe de pénétrabilité de bitume .....	48
Tableau 5.2	Equivalente du sable .....	53
Tableau 5.3	Poids spécifique vrai .....	53
Tableau 5.4	Analyse granulométrique de l'échantillon .....	56
Tableau 5.5	Caractéristiques physiques du bitume .....	57
Tableau 5.6	Caractéristiques des éprouvettes en béton bitumineux .....	62
Tableau 5.7	La résistance à la compression .....	64
Tableau 5.8	Pourcentage d'imbibition .....	65
Tableau 5.9	Pourcentage de gonflement .....	65
Tableau 5.10	Stabilité suivant Marshall.....	66
Tableau 5.11	Perméabilité .....	67
Tableau 5.12	Tableau Récapitulatif.....	67
Tableau 6.1	Analyse granulométrique (Filler 5%).....	72
Tableau 6.2	Analyse granulométrique (Filler 8%).....	73
Tableau 6.3	Analyse granulométrique (Filler 10%).....	74
Tableau 6.4	Analyse granulométrique (Filler 15%).....	75
Tableau 6.5	Analyse granulométrique (Filler 20%).....	76
Tableau 6.6	Résultats des essais (Filler 5 %).....	77
Tableau 6.7	Résultats des essais (Filler 8 %).....	78
Tableau 6.8	Résultats des essais (Filler 10 %).....	79
Tableau 6.9	Résultats des essais (Filler 15 %).....	80
Tableau 6.10	Résultats des essais (Filler 20 %).....	81
Tableau 6.11	Résultats des essais (tableau récapitulatif) .....	81
Tableau 6.12	Résistance à la compression (Filler 8 %).....	85
Tableau 6.13	Résistance à la compression (Filler 10 %).....	85
Tableau 6.14	Résistance à la compression (Filler 15 %).....	86
Tableau 6.15	Résistance à la compression (Filler 20 %).....	86
Tableau 6.16	Pourcentage d'imbibition (Filler 8 %).....	87
Tableau 6.17	Pourcentage d'imbibition (Filler 10 %).....	87
Tableau 6.18	Pourcentage d'imbibition (Filler 15 %).....	87
Tableau 6.19	Pourcentage d'imbibition (Filler 20 %).....	87
Tableau 6.20	Pourcentage de gonflement (Filler 8 %).....	88
Tableau 6.21	Pourcentage de gonflement (Filler 10 %).....	88
Tableau 6.22	Pourcentage de gonflement (Filler 15 %).....	88
Tableau 6.23	Pourcentage de gonflement (Filler 20 %).....	89
Tableau 6.24	Stabilité (Filler 8%).....	89
Tableau 6.25	Stabilité (Filler 10%).....	89
Tableau 6.26	Stabilité (Filler 15%).....	90
Tableau 6.27	Stabilité (Filler 20%).....	90
Tableau 6.28	Perméabilité (Filler 8%).....	90
Tableau 6.29	Perméabilité (Filler 10%).....	91
Tableau 6.30	Perméabilité (Filler 15%).....	91
Tableau 6.31	Perméabilité (Filler 20%).....	91
Tableau 6.32	Résultats des essais (tableau récapitulatif) .....	91
Tableau 7.1	Paramètres de solubilité pour différents polymères.....	101
Tableau 7.2	Principaux agents chimiques utilisés dans la modification des bitumes.....	103

## Liste des symboles

ES	Equivalente de sable
$h_1$	Sable propre + élément fins
$h_2$	Sable propre
$\rho_s$	Masse volumique absolu
$V_1$	Volume 1 de l'eau
$V_2$	Volume 2 de l'eau
$D_m$	Densité vraie de l'éprouvette
$P_b$	Pourcentage en poids du bitume
$D_b$	Densité du bitume
$P_{a1,a2,a3}$	Pourcentage en poids des agrégats
$D_{a1,a2,a3}$	Densité de l'agrégats 1, 2,3, etc.....
$V_m$	Pourcentage volumétrique des vides résiduels
C	Pourcentage volumétrique des pleins
$d_A$	Densité apparente de l'agrégat dans l'éprouvette
$D_A$	Poids spécifique de l'agrégat
$V_A$	Pourcentage volumétrique des vides occupés par l'air
$R_b$	Pourcentage de vides comblés par le bitume
$V_b$	Volume des vides occupés par le bitume
R0	Résistance à la compression à une température de 0°C
R20	Résistance à la compression à une température de 20°C
R50	Résistance à la compression à une température de 50°C
$K_t$	Coefficient de la stabilité calorifique
$K_e$	Coefficient de souplesse
R	Résistance à la compression
P	Charge maximale
S l	Section latérale
$P_{im}$	Pourcentage d'imbibition
$P_0$	Poids de l'éprouvette avant l'immersion
Ph	Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours
Pg	Pourcentage de gonflement
$V_0$ et $V_h$	Sont respectivement les volumes de l'éprouvette avant et après l'immersion pendant 28 jours
K	Perméabilité
q	Débit de fuite
l	Epaisseur de la plaque
h	Pression en (cm) d'eau, mesurée depuis la face inférieure de la plaque
f	Surface de l'éprouvette

## RESUME

Les masques en béton bitumineux ont été historiquement une réelle solution pour constituer l'organe d'étanchéité des barrages en remblai et autres ouvrages hydrauliques,. Les progrès continus dans la conception et la construction des masques de ce type nous ont conduits à procéder à une étude de ses caractéristiques.

Le masque d'étanchéité en béton bitumineux du barrage Bouhanifia "Algérie" est appliqué sur le talus amont par l'intermédiaire d'une couche drainant de béton de ciment poreux. La stabilité du masque pouvant devenir précaire aux températures atteintes par insolation directe (70°C), il était indispensable de le recouvrir d'une protection thermique. Cette solution, sans doute parfaite, avait l'inconvénient d'être fort coûteuse. Cette recherche est divisée en 3 parties :

La première partie, et pour s'assurer que le béton bitumineux adopté (masque) ne risque pas de se déformer et de couler sous l'influence de température très élevée, nous avons étudié le comportement mécanique et physique du masque sous l'influence de température qui peut atteindre 70c sans la couche de protection thermique. Cette expérience a permis de déterminer que l'échantillon a gardé sa forme initiale. Les résultats obtenus ont confirmé que le masque du barrage Bouhanifia peut résister à l'action de la température sans la nécessité de la protection thermique.

La deuxième partie, et pour l'amélioration des caractéristiques du béton bitumineux, nous avons étudié les caractéristiques mécaniques et physiques du bitume et la stabilité sur le talus, pour ce faire, on doit changer le pourcentage de filler dans le mélange. Ensuite, les échantillons doivent être préparés en laboratoire et testés. Cette étude montre que : L'amélioration du béton bitumineux avec des quantités convenables de filler fait baisser le volume des vides, rends le mélange plus dense et imperméable. Par contre, des quantités excessives de filler accroîtront notablement la demande en bitume en raison de la surface spécifique accrue, augmenter le fluage les pourcentages d'imbibition et du gonflement, donc diminuer la stabilité sur talus.

Dans la troisième partie, nous avons donné une aperçue sur l'amélioration des caractéristiques du béton bitumineux par les polymères.

**Mots clés :** Béton bitumineux ; Etanchéité ; Température ; filler ; Stabilité; polymère .

## **Abstract**

Bituminous concrete masks have historically been a real solution to the sealing organ of the dams and other hydraulic works, given the mechanical and hydraulic qualities of the material. The continuous progress in the design and construction of the masks of this type led us to carry out a study of its characteristics.

The bituminous concrete mask of the Bouhanifia "Algeria" dam is applied on the upstream slope through a layer of porous cement concrete. Since the stability of the mask could become precarious at high temperatures of (70 ° C), it was necessary to cover it with thermal protection. This solution, no doubt perfect, had the disadvantage of being very costly. This research is divided into 3 parts:

Part one: to ensure that the adopted bituminous concrete (mask) is not likely to distort, and to sink under very high temperature influence, we studied the mechanical and physical behavior of the mask under the influence of temperature that can wait 70 C ° without the thermal protection layer. This experiment determined that the sample kept its original form.

The results obtained confirmed that the mask of the Bouhanifia dam can withstand the temperature action without the need for thermal protection.

The second part, and to improve the characteristics of bituminous concrete, examined the mechanical and physical characteristics of bitumen and stability on the slope. To do this, the percentage of filler in the mixture must be changed, and then the samples must be prepared in the laboratory and tested. This study shows that: Improving bituminous concrete with appropriate amounts of filler reduces the volume of vacuums, renders the mixture denser and impermeable. However, excessive amounts of filler will significantly increase bitumen demand due to the increased specific surface area, increase the creep, and increase the percentages of imbibition and swelling. Therefore decrease slope stability.

In Part Three, we gave an insight into the improvement of bituminous concrete characteristics by polymers.

**Key words:** Bituminous concrete; Waterproofness; Temperature; filler; Stability; polymer.

## ملخص

من الناحية التاريخية، كانت الأقمعة المصنوعة بمادة الخرسانة الإسفلتية حلاً حقيقياً لتشكيل العضو المانع للتسرب في السدود وغيرها من الهياكل الهيدروليكية. التقدم المستمر في تصميم وبناء أقمعة من هذا النوع قادنا إلى دراسة خصائصه.

طبقة الكتامة المصنوعة بمادة الخرسانة الإسفلتية لسد بوحنيفية " الجزائر" موضوعة على المنحدر الأمامي بواسطة طبقة التصريف من الإسمنت المسامي، استقرار طبقة الكتامة يصبح مهدد في درجة حرارة مباشرة تصل إلى غاية (70 م°)، لذا كان من الضروري حمايتها عن طريق تغطيتها بطبقة من الخرسانة المسلحة، هذا الحل بدون شك ممتاز غير أنه يبقى جد مكلف. ينقسم هذا البحث إلى 3 أجزاء:

- الجزء الأول، ولضمان عدم تشوه خرسانة الإسفلت المعتمدة (القناع) ، والتدفق تحت تأثير درجات الحرارة المرتفعة جداً ، درسنا السلوك الميكانيكي والمادي للقناع تحت تأثير درجة الحرارة التي يمكن أن تصل 70 درجة مئوية، دون طبقة الحماية الحرارية. كانت نتيجة هذه التجربة أن العينة حافظت على شكلها الأصليين، كما أكدت النتائج التي تم الحصول عليها أن قناع سد Bouhanifia يستطيع مقاومة درجة الحرارة دون الحاجة إلى الحماية الحرارية.

- الجزء الثاني ، ولتحسين خصائص الخرسانة الإسفلتية ، قمنا بدراسة الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للبيتومين والثبات على المنحدر. للقيام بذلك ، يجب علينا تغيير نسبة الفيلر في الخليط ، ثم يجب إعداد العينات في المختبر واختبارها. توضح هذه الدراسة أن: تحسين الخرسانة الإسفلتية بكميات كافية من الفيلر يقلل من حجم الفراغ ، مما يجعل الخليط أكثر كثافة وغير نافذ. من ناحية أخرى ، فإن الكميات الزائدة من الفيلر ستزيد بشكل كبير من الطلب على الإسفلت بسبب زيادة مساحة السطح ، تكبر الزحف و تزيد نسب التسرب الانتفاخ مما ينقص من الاستقرار على المنحدر.

- في الجزء الثالث، قمنا بإعطاء لمحة نظرية على تحسين خصائص الخرسانة الإسفلتية، عن طريق إضافة البوليمير .

**الكلمات الأساسية:** الخرسانة الإسفلتية، الكتامة، الحرارة، الفيلر، الاستقرار، البوليمير.

# **Introduction générale**

Le barrage est un ouvrage destiné au stockage de l'eau, pour assurer efficacement cette fonction, il doit être étanche le plus possible. A ce propos, il convient de bien distinguer la notion d'étanchéité du corps du barrage, un contrôle défectueux des écoulements à travers le barrage met en cause à la fois la stabilité, par la réparation défavorable des sous-pressions et sa pérennité par l'accélération des processus de vieillissement.

L'organe d'étanchéité d'un barrage assure la fonction première de l'ouvrage qui est de retenir de l'eau et éviter l'infiltration à travers le corps de celui-ci. L'utilisation des masques en béton bitumineux comme organe d'étanchéité est une technique parfaitement maîtrisée et qui a donné de façon générale d'excellents résultats pour des coûts de travaux compétitifs par rapport aux solutions concurrentes. Cette technique est utilisée depuis longtemps pour assurer l'étanchéité des barrages en remblai. Dans les soixante dernières années, plus de 300 barrages de hauteur de 30 m et des réservoirs de hauteur supérieur à 15 m, leur étanchéité a été assurée par ce type de masque.

L'expérience de l'utilisation des masques d'étanchéité amont en béton bitumineux dans le monde est présentée par des travaux de recherche publiés dans ce domaine, certains d'entre eux sont mentionnés comme suit :

- " Watertightness, cracking resistance, and self-healing of asphalt concrete used as a water barrier in dams". Par :Yingbo Zhang, Kaare Höeg, Weibiao Wang, Yue Zhua, 2013, 50(3): 275-287.
- " Investigation on the temperature of the asphalt-concrete facing of embankment dams" par :Karel Adam, Jaromír Āh, Miroslav Āpano. 2016, Volume 9, Issue 1, Pages 73-81.
- "Effect of upstream semi-impervious blanket of embankment dams on seepage" par:F. Salmasi M. Nouri 29 September 2017.
- "Sustainability on pavement engineering" par :Jeffrey L. LeeDar HaoChen, Tatsuya Ishikawa, November 2016. Volume 9, Issue 6, Pages 403-404.
- "Asphalt concrete facing for rockfill dams built by directional blasting" par : Yang, Q, Sun, Z. and Ding, P., 1988.. 16th Cong. Large Dams, San Francisco, Vol. 2, 1091–1103.
- "Advances in Rockfill Structures Editors: das Neves, E. Maranha" par : J. L. Justo (Ed.) pp 611-650 Part of the NATO ASI Series book series (NSSE, volume 200)

L'expérience de l'utilisation des masques d'étanchéité amont en béton bitumineux s'est peu répondu en Algérie : barrage de Ghrib (1926-1938), (Bouhnifia (1930-1941) et Sarno (1947-1954))[6], le comportement des masques en béton bitumineux des barrages algériens au cours de leur vie est généralement satisfaisant, à l'exception des problèmes présentés dans la couche de protection qui nécessite chaque fois l'entretien ou la rénovation complète, ce qui revient négativement sur le cout totale de l'ouvrage. (CFGB, 1973)

Le barrage de Bouhnifia « Algérie 1930 » a été implanté dans un terrain médiocre. Afin d'éviter les risques de tassement, une digue souple capable de s'adapter aux mouvements du sol a été réalisée. L'étanchéité de ce barrage est assurée par un masque amont souple et étanche en béton bitumineux de 12 cm d'épaisseur placé sur le talus amont. Historiquement cette pratique a montré que c'est une réelle solution pour constituer

l'organe d'étanchéité des barrages en remblai et autres ouvrages hydrauliques, étant donné les qualités mécaniques et hydrauliques du matériau.

Le masque en béton bitumineux doit être étanche et stable. L'étanchéité dépend de la granulométrie des granulats, du pourcentage de liant bitumineux et du compactage. La stabilité dépend du type du bitume, du pourcentage des vides après compactage et de la granulométrie des granulats. Les principaux matériaux constituant les masques en béton bitumineux sont : les granulats, le filler et le bitume. Les progrès continus dans la conception et la construction des masques de ce type nous ont conduits à procéder à une étude de ses caractéristiques.

Le problème posé au barrage de Bouhnifia est particulièrement délicat en raison de l'instabilité du masque qui pouvait devenir précaire à la température atteinte par insolation directe (+70°C), il est donc indispensable de le recouvrir d'une protection thermique. Cette dernière est constituée par une couche de béton de ciment de 10 cm d'épaisseur, armée d'un grillage d'acier martin galvanisé. Cette solution, sans doute parfaite, avait l'inconvénient d'être fort coûteuse.

Dans le présente travail et d'une part, pour éviter la mise en place de deux couches (couche d'étanchéité et couche de protection thermique) et minimiser le coût de réalisation, nous allons étudier le comportement mécanique et physique du masque sous une température de (+70°C) en négligeant la protection thermique. Pour aboutir à ce but nous allons placer un échantillon confectionné sur un parement incliné 1/1 (pente du barrage Bouhanifia) et maintenu pendant plus de 48 heures dans une étuve à la même température. Les éprouvettes ne doivent pas se déformer au cours de l'essai.

D'une d'autre part pour améliorer les caractéristique du béton bitumineux, nous allons étudier l'influence de filler sur les caractéristiques du béton bitumineux, pour cela, nous allons préparer des éprouvettes par des différents pourcentages de filler ensuite nous allons appliquer des essais sur ces éprouvettes et nous allons déterminer la meilleure valeur qui nous permettre d'améliorer les caractéristiques du béton bitumineux.

Pour aboutir à ce but on a adopté la méthodologie suivante :

Après une introduction générale, Cette thèse est structurée en 7 chapitres :

- Le premier chapitre résume une présentation générale sur le bitume et le béton bitumineux, leurs utilisations dans les différents domaines et leur participation au développement durable.
- Le second chapitre, récapitule les types des barrages et traité en détail les différentes variantes proposées pour l'étanchéité du barrage en remblai.
- Le troisième chapitre, traite l'étanchéité des barrages en remblai par le masque en béton bitumineux avantages et inconvénients.
- Le quatrième chapitre présente l'expérience Algérienne dans l'utilisation des masques étanches en béton bitumineux.

## *Introduction générale*

---

- Le cinquième chapitre, étude de comportement du masque du barrage Bouhnifia (Algérie) en absence de la protection thermique.
- Le sixième chapitre, Etude de l'amélioration des caractéristiques du masque en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler.
- Enfin, le septième chapitre étale une étude théorique sur l'amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux par les polymères.

# **Chapitre 1**

## **L'utilisation du béton bitumineux dans le domaine d'hydraulique**

## 1.1 Définitions

### 1.1.1 Le bitume

Est un produit solide ou semi solide obtenu par la distillation d'un pétrole à base asphaltique, il devient un liquide visqueux quand on le chauffe. Des variations dans le processus de raffinage changent la qualité du bitume obtenu. [53] (Figure 1.1)

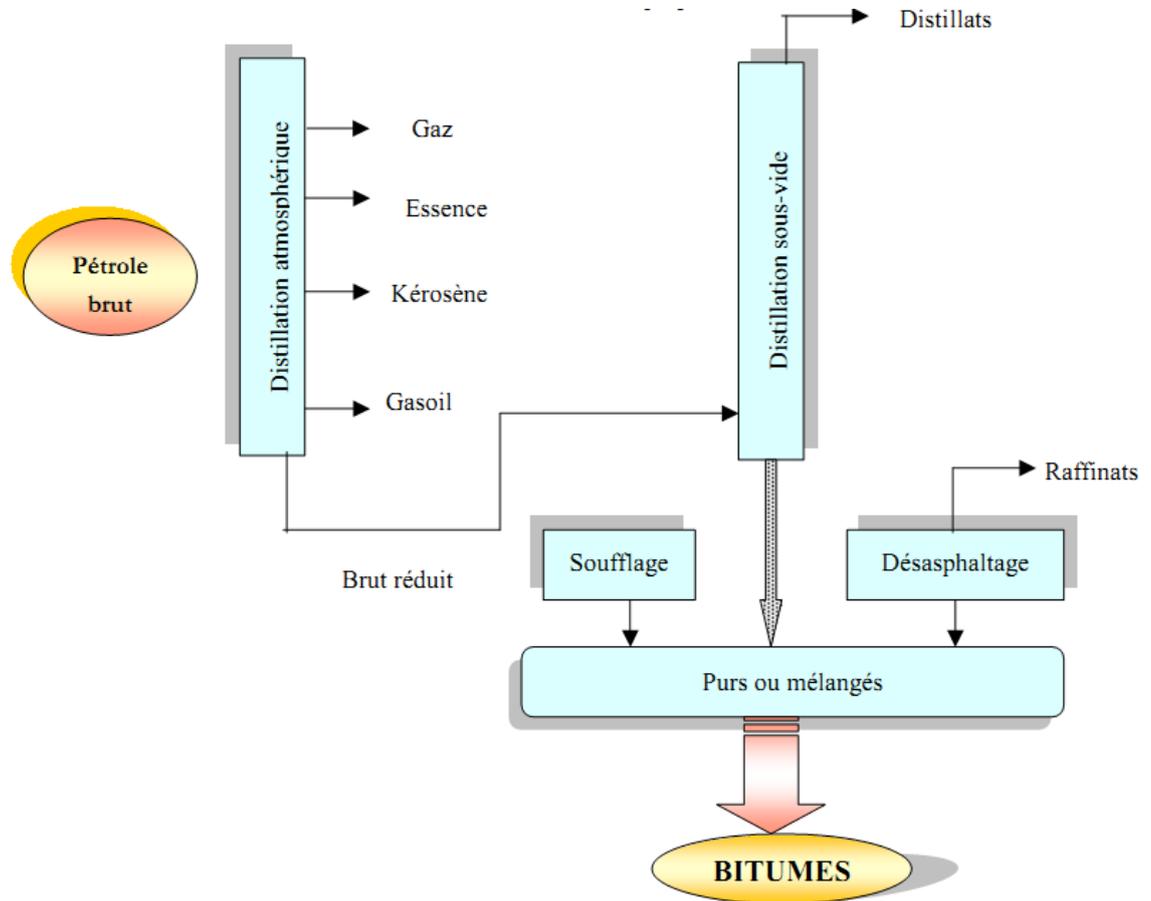


Figure 1.1 : Schéma général de la fabrication industrielle des bitumes

Suivant les conditions d'emploi et les propriétés recherchées, le bitume peut être utilisé pur ou en association avec d'autres composants. Il existe également des bitumes fluidifiés (par addition des solvants), des bitumes fluxés (mélange de bitume avec des huiles de houille et des dérivés pétroliers) et des bitumes modifiés par ajout des polymères.

Les différents procédés de fabrication, qui viennent de faire l'objet d'une présentation très sommaire, permettant d'obtenir une gamme variée de produits tous désignés par l'appellation bitume.

### 1.1.2 Le béton bitumineux

Aussi appelé enrobé bitumineux, est composé de différentes fractions de gravillons, de sable, de filler et utilise le bitume comme liant hydrocarboné. (le bitume) est principalement responsable de la cohésion tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l'ensemble.

L'enrobé est fabriqué dans des usines appelées " centrales à enrobés ", fixes ou mobiles, utilisant un procédé de fabrication continue ou par gâchées. Il est mis en œuvre à chaud (150 °C environ) à l'aide de machines appelées " finisseurs " qui permettent de le répandre en couches d'épaisseur désirée. Bien que d'autres méthodes existent, telles que la mise en émulsion ou le moussage, les bitumes sont majoritairement (à 70 %) utilisés dans des applications dites « à chaud », où le liant est fluidifié par élévation de la température autour de 160°C, afin d'être mélangé dans des malaxeurs industriels, à des granulats calibrés préalablement séchés. [114] (Figure 1.2)

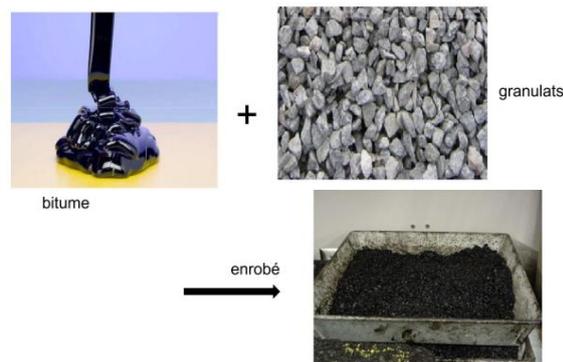


Figure 1.2 : Composant de béton bitumineux

Les enrobés à chaud de forte compacité offrent un autre moyen d'exécuter un revêtement ou cuvelage imperméable. Les deux types fondamentaux de ces enrobés sont le béton bitumineux et micro béton bitumineux.

La fabrication des enrobés bitumineux se décompose en différentes étapes :

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

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

## 1.2 Historique

Le mot anglais «asphalte» vient du mot grec «asphaltos», qui signifie «sécurisé». Bien que l'asphalte que nous utilisons aujourd'hui est le plus souvent raffiné, l'asphalte peut être trouvé à l'état naturel dans les lacs d'asphalte et de rock asphalt. La première utilisation connue de l'asphalte pour quoi que ce soit était par les anciens Sumériens autour de 3000 avant JC comme adhésif pour incruster des métaux précieux, pierres, etc. Anciens personnes l'ont utilisé comme pour l'art, l'embaumement, l'imperméabilisation, calfeutrage et de mortier. [107]

Christophe Colomb débarqua sur les côtes de La Trinité en 1498 et a découvert le lac d'asphalte célèbre (Figure 1.3). Cependant, son utilisation était rare depuis des siècles, devenant une option véritablement viable dans les années 1800. [114]



Figure 1.3 : Gisement de bitume naturel  
(Lake Asphalt Trinidad)

En 1800, Thomas Telford construit plus de 900 milles de routes en Écosse, en perfectionnant la méthode de construction de routes avec des pierres cassées réunies pour former une surface dure pour construire une autoroute à péage écossais. Plus tard, pour réduire la poussière et l'entretien, les constructeurs utilisèrent goudron chaud pour lier les pierres brisées ensemble, la production de "tarmacadam" trottoirs.

Les mélanges bitumineux premiers produits dans le mix États-Unis ont été utilisés pour les trottoirs, passages pour piétons, et même des routes de départ dans les années 1860. En 1870, un chimiste belge nommé Edmund J de Smedt, posa le revêtement d'asphalte premier véritable dans ce pays, un mélange de sables en face de l'hôtel de ville de Newark, New Jersey. Conception de Smedt a été calquée sur un trottoir d'asphalte naturel placé sur une autoroute française en 1852. (Figure 1.4)



Figure 1.4 : Schéma général de la fabrication industrielle des bitumes

Jusque 1900, la quasi-totalité d'asphalte utilisé aux États-Unis provient des sources naturelles du lac Trinidad et Bermudez (lac au Venezuela). En 1907, la production de bitume raffiné avait dépassé l'utilisation de l'asphalte naturel. Dans les années 1950, les ingénieurs des routes provinciales et fédérales contrôlent presque tous les aspects de la construction de routes, de l'extraction de granulats au mélange de l'asphalte pour son placement sur la chaussée.

L'industrie elle-même a dirigé la campagne pour l'innovation et la qualité dans la conception et la construction de routes asphaltées. L'Association Nationale Asphalt Pavement a été créée en 1955. L'une des premières activités entreprises par l'organisation naissante était un programme d'amélioration de la qualité, qui a parrainé des essais d'asphalte dans les universités et les laboratoires d'essais privés, puis partagé les résultats avec les membres.

En 1986, NAPA a créé le Centre national pour Asphalt Technologie (The National Center for Appropriate Technology **NCAT**) de l'Université Auburn, en Alabama, en fournissant une approche centralisée et systématique à la recherche d'asphalte. NCAT Aujourd'hui, avec son centre de recherche et de 1,7 mile piste d'essai chaussée, est l'institution chef de file mondial en matière de recherche asphaltée.

Au cours des 30 dernières années, la polyvalence de l'asphalte a conduit à son utilisation accrue dans d'autres applications, et également de plus en plus utilisé comme base pour les barrages en remblai.

### **1.3 Différents types de béton bitumineux**

On peut classer les enrobés bitumineux par leur granulométrie et leurs performances mécaniques à: [41]

- Les Bétons bitumineux Semi grenus (BBSG) NFP 98-130, très utilisés en France pour les couches de roulement. Épaisseur de couche d'environ 6 cm.
- Les Bétons bitumineux minces (BBM) NFP 98-132, épaisseur de 3 à 5 cm.
- Les Bétons bitumineux très minces (BBTM) NFP 98-137, épaisseur de couche est 2,5 cm. Très utilisé en France pour les couches de roulement, elle permet de réaliser une couche d'usure qui, après quelques années, pourra être rabotée et refaite.

Par rapport aux autres mélanges bitumineux (Sand-asphalt, enrobés denses. . .), le béton bitumineux présente les avantages suivants:

- 1- Une meilleure homogénéité d'ensemble qui résulte à la fois :
  - du choix des granulats: roche massive saine et non altérée;
  - de la composition des granulats : un fuseau de granularité particulièrement étroit;
  - du mode de fabrication des granulats: reconstitution soignée en centrale, par classes granulaires.
- 2- Une meilleure étanchéité :
  - le pourcentage de vides des mélanges après cylindrage est généralement faible.
  - L'apport de compactage dû au trafic conduit à terme à des revêtements pratiquement imperméables (teneur en vides inférieure à 6%).
- 3- Une grande stabilité qui peut atteindre des valeurs égales au double de celles obtenues avec un Sand-asphalt ou avec un enrobé dense;
- 4- Une meilleure résistance à la glissance due à la qualité des granulats utilisés: dureté, résistance accrue au polissage, forme mieux à contrôler.

### **1.4 Application du béton bitumineux**

#### **1.4.1 Dans le domaine de construction et travaux publics**

Le béton bitumineux est principalement exploité dans la construction routière (85%), où il fournit le liant des enrobés bitumineux. L'emploi du bitume s'est accru avec le développement de l'automobile. L'utilisation du bitume, naturellement collant, a permis de régler le problème de la poussière engendrée par la circulation sur le macadam. Progressivement, grâce à leurs caractéristiques de résistance, d'imperméabilité, et de facilité de mise en œuvre, des revêtements bitumineux ont recouvert pratiquement toutes les routes. [107]

#### **1.4.2 Dans le domaine d'hydraulique**

Depuis longtemps, le bitume est imposé comme matériau de base dans la construction des routes et des bâtiments. Ce n'est qu'au cours des vingt dernières années que son utilisation s'est étendue aux travaux hydrauliques et c'est seulement maintenant qu'il est reconnu comme un matériau de base, comme il est déjà depuis longtemps pour les routes et les bâtiments. [5]

Les premières applications hydrauliques du bitume sont surtout le domaine des revêtements étanches, mais il apparut bientôt que le bitume possédait des qualités qui le rendaient intéressant pour d'autres types d'emplois tel que : les bassins, les réservoirs, les barrages et les canaux.

Cette famille d'enrobés est utilisée à des fins hydrauliques pour étancher des ouvrages, drainer ou stocker de l'eau.

- **Les enrobés étanches** : les enrobés étanches sont destinés à être mis en œuvre sur des ouvrages essentiellement en terre. Leur domaine d'emploi est vaste comme: parement amont des barrages, noyau interne des barrages, radiers et berges de canaux.

- **Les enrobés drainants** : ces enrobés exercent la fonction de drainage et d'évacuation de l'eau sur des ouvrages spécifiques : diverses plateformes industrielles, routières et piétonnières ; talus étanche en terre homogène.

Les différents types de travaux hydrauliques à base de bitume ont été de plus en plus utilisés dans le monde, on cite :

#### **1.4.2.1 Comme une application superficielle :**

- **Revêtement superficiel** : le traitement consiste en application superficielle d'un film de liant bitumineux, pour les ouvrages hydrauliques, le liant peut être soit un bitume, soit un bitume fluxé à forte viscosité.
- **Enduit de scellement** : le but d'un enduit de scellement est de rendre imperméable ou moins perméable la surface sur laquelle on applique non comme tapis protecteur, mais comme scellement.
- **Enduit d'apprêt** : un enduit d'apprêt est un traitement initial appliqué à une surface absorbante pour la rendre plus convenable à un traitement ultérieur.
- **Enduit d'accrochage** : Est assuré une bonne adhérence entre deux couches qui, pourraient ne pas être liées. Il diffère de la couche d'apprêt en ce qu'il n'agit pas par absorption partielle ou complète dans la surface sur laquelle il est appliqué, mais comme un film adhérent à la surface d'une couche inférieure sur laquelle la couche supérieure s'agrippera.
- **Traitement du sol** : on peut traiter le sol pour lui donner une grande stabilité on le rendre imperméable. Les types et catégorie de produit bitumineux utilisé dans ce but dépendent de la perméabilité du sol et des conditions climatiques.

#### **1.4.2.2 Comme un revêtement et cuvelages :**

La méthode utilisée dans les constructions de revêtement hydraulique varie selon la fonction du revêtement. Les revêtements peuvent être nécessaires comme protection contre l'érosion ou l'abrasion ou pour réaliser un parement imperméable ou dans ces deux buts. Les cuvelages doivent en général être imperméables.

#### **1.4.2.3 Comme une étanchéité des barrages :**

Le concept de l'asphalte comme un moyen d'étanchéité à l'intérieur de barrages en remblai a été d'abord développé en Allemagne dans les années 1960.

Le premier barrage de base d'asphalte est construit par Sig. Hesselberg en 1981, cependant, Veidekke, dans une joint-venture avec Korsbrekke & Lorck, a remporté son premier contrat barrage d'asphalte de base pour la construction du barrage Riskallvatn.

À partir de 1989, les activités de Veidekke et Sig. Hesselberg ont été fusionnées en une seule unité et l'internationalisation comme une activité de construction de barrages en Norvège diminué

Plus d'une centaine de barrages à noyau d'asphalte ont été construits dans le monde depuis 1964, dans toutes les conditions climatiques.

Tous ont un rendement exceptionnel avec une fuite négligeable.

**Des exemples des ouvrages réalisés avec le béton bitumineux sont mentionnés dans l'annexe 1**

### **1.5 Conclusion**

Le bitume est un produit naturel (ou d'origine naturelle) utilisé par l'homme depuis l'antiquité ; il a permis de nombreuses avancées comme la photographie, la peinture, l'isolation, la construction des routes, etc.

Aujourd'hui, sur les 100 millions de tonnes de bitume consommées par an dans le monde, 85 % sont utilisés pour la construction de routes. L'utilisation de béton bitumineux dans le domaine hydraulique et trouvé dans plusieurs aspects, la construction, l'isolation et surtout comme organe d'étanchéité, où il a réussi dans de nombreux projets. Dans ce contexte, l'industrie routière a largement contribué à l'avancée des recherches scientifiques sur ce produit, en termes technologiques ou en matière de santé.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier les différents organes d'étanchéité pour un barrage en remblai.

## **Chapitre 2**

# **Étanchéité des barrages en remblai**

### 2.1 Généralité

Les barrages existent depuis la préhistoire (réserve d'eau potable, d'irrigation, viviers, piscicultures) mais c'est au Moyen Âge qu'ils se sont fortement développés en Europe pour alimenter les moulins à eau. Il semble qu'ils aient parfois pu s'appuyer sur des sédiments accumulés en amont d'embâcles naturels, ou sur les lieux de barrages de castors dont la toponymie conserve des traces. Les techniques de la fin du XIX<sup>e</sup> et du début du XX<sup>e</sup> siècle ne permettaient pas l'édification de retenue de grande capacité. Les premiers barrages ont surtout une fonction de dérivation d'une partie de l'eau (écrémage) vers une conduite forcée ou un canal d'irrigation.

L'amélioration des techniques et des bétons dans le premier quart du XX<sup>e</sup> siècle permet d'envisager la réalisation de retenues plus conséquentes, capables de réguler la production hydro-électrique. La géologie (nature des roches sur lesquelles sera édifié le barrage, agrégats extraits sur place) et la topographie (largeur de la vallée), commande le type de barrage utilisé. [37]

Les barrages sont conçus dans un objectif bien précis, mais certains ouvrages peuvent combiner plusieurs usages. Parmi ces fonctions, on trouve la régulation des cours d'eau (maintien d'un niveau minimum des eaux en période de sécheresse, barrage écrêter de crue), le stockage d'une réserve d'eau, utilisée pour alimenter un canal ou une ville, lutter contre les incendies ou irriguer les cultures, une prévention relative des catastrophes naturelles (crues, inondations), par la création des lacs artificiels ou des réservoirs, la production d'énergie électrique, la plaisance ou encore la décantation et le stockage de déchets miniers.

### 2.2 Les différents types des barrages

Les barrages forment avec le terrain sur lequel ils sont construits un ensemble indissociable : à chaque site, un type de barrage, un dimensionnement adapté tant sur le plan technique qu'économique. C'est pourquoi il n'existe pas de barrage type standard. De plus, certains sont formés par la juxtaposition de plusieurs structures différentes justifiées par des caractéristiques de sol de fondations particulières et aussi par des choix économiques. En se contentant de définir quelques grandes catégories, on peut classer les barrages en fonction du matériau qui les constitue : aux barrages construits en matériaux durs (maçonnerie autrefois, aujourd'hui le béton), et aux barrages en remblai en matériaux meubles (la terre, les enrochements) :

#### 2.2.1 Les barrages en béton

##### 2.2.1.1 Barrages poids

De forme massive et triangulaire, résistent à la poussée de l'eau grâce à leur poids, (Figure 2.1)

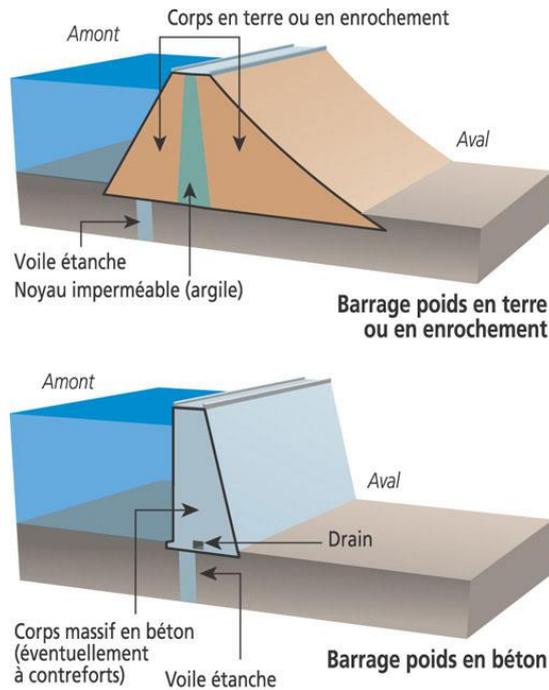


Figure 2.1 : Coupe du barrage poids

### 2.2.1.2 Barrages voûtes

La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement (on la qualifie alors de voûte à double courbure). (Figure 2.2)

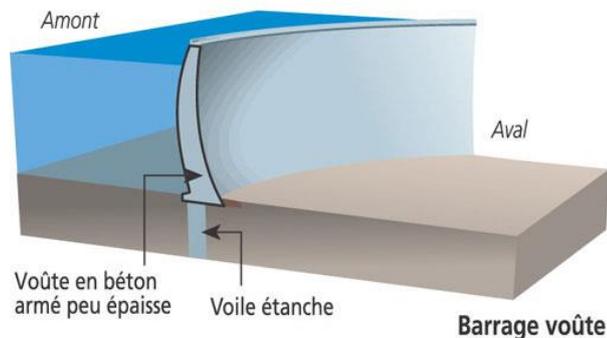


Figure 2.2 : Coupe du barrage voûte

### 2.2.1.3 Barrages à contreforts

Sont constitués d'une série de murs (les contreforts) construits dans la vallée parallèlement à l'axe de la rivière, l'espace entre les contreforts étant bouché par une dalle en béton ou une voûte.

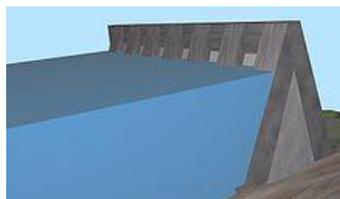


Figure 2.3 : Coupe du barrage à contreforts

### 2.2.2 Les barrages en remblai

On appelle barrages en remblais tous les barrages construits avec des matériaux terreux. Cette catégorie de barrages regroupe plusieurs catégories différentes par les types de matériaux utilisés et la méthode employée pour assurer l'étanchéité.

Il s'agit des barrages en terre où enrochement, ils sont particulièrement adaptés aux sites peu encaissés présentant des qualités de terrain médiocres. Ils sont particulièrement employés pour les barrages de faible hauteur, bien qu'on trouve des ouvrages exceptionnels de plus de 100 m de haut. La proportion de barrages (de plus de 15 m) réalisés en terre ou en enrochement est d'environ 70%. Cette famille regroupe plusieurs catégories très différentes. Les différences proviennent des types de matériaux utilisés, et de la méthode employée pour assurer l'étanchéité. [17]

La stabilité propre du barrage est assurée par le poids du massif. En général, ces barrages présentent des répartitions de charge qui les rendent compatibles avec les supports médiocres. Par ailleurs, leur souplesse permet une adaptation aux déformations et tassements des supports. Par contre, les volumes à mettre en œuvre deviennent rapidement très importants. On doit donc envisager les problèmes de tassement du sol support, et d'infiltration dans le sol de fondation.

Les tassements du sol support sont d'autant plus nuisibles qu'ils se produisent tardivement (après la réalisation), et de manière différentielle (les tassements sont plus importants au centre). Ces tassements peuvent provoquer des fissurations importantes de l'ouvrage. Elles peuvent être traitées par les méthodes usuelles de consolidation, ou en adaptant la vitesse de construction au temps de dissipation des tassements.

Les infiltrations dans le sol de fondation peuvent provoquer des fuites importantes mais aussi des dégradations par entraînement des matériaux (phénomène de renard).

Le plus souvent, on dispose un écran d'étanchéité (injections, palplanches, paroi moulée,...) en zone amont ou dans le prolongement de la zone d'étanchéité (barrage en enrochement ou à noyau). En arrière de cet écran, on place une zone de drainage permettant d'évacuer les surpressions et les infiltrations éventuelles.

**NB : Le problème essentiel dans les barrages en remblai est donc leur étanchéité et leur stabilité interne.**

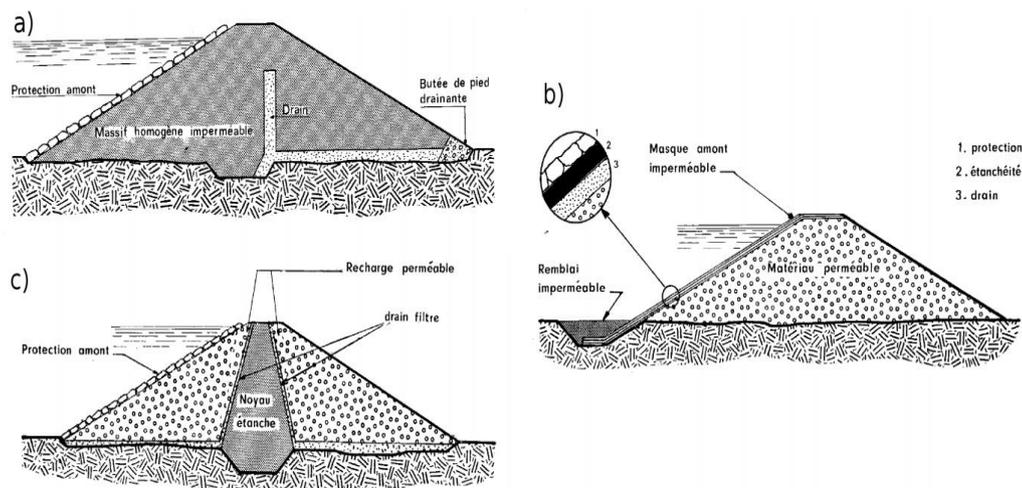


Figure 2.4: Différents types de barrage en remblai

### 2.2.2.1 Barrage en terre

#### 2.2.2.1.1 Terre homogène

Un barrage en terre homogène est le type de barrage le plus simple et, sans aucun doute, le plus ancien. Il consiste à construire en travers du lit de la rivière un massif en terre dont les pentes sont assez douces pour assurer la stabilité et la terre assez imperméable (typiquement de l'argile) pour éviter ne passe au travers du barrage.

Les parements peuvent comprendre des banquettes intermédiaires appelées risbermes, ce qui améliore encore la stabilité et facilite la surveillance et l'entretien. Comme pour tous les barrages en remblai, ce type de barrage s'accommode de fondations moins performantes que pour les barrages en béton. La conception de ces ouvrages est fortement dépendante de la quantité de remblai de qualité suffisante disponible sur le site ou à proximité immédiate. [17] (Figure 2.5)

L'étanchéité du massif est assurée par l'épaisseur du barrage et l'imperméabilité du matériau.

#### Barrage en terre compactée, homogène

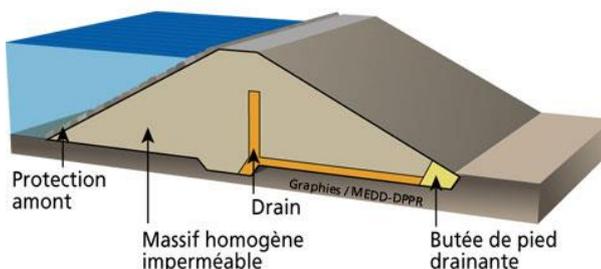


Figure 2.5 : Barrage en terre compactée, homogène

Les quantités disponibles de matériaux présentant les qualités nécessaires à la réalisation du barrage homogène sont souvent faibles, ce type d'ouvrage est donc le plus souvent réservé aux ouvrages de faible importance.

Parmi les barrages français les plus hauts de ce type, on peut citer le barrage de Matemale (34 m) ou celui de Montbel (36 m). [17] **Annexe 2**

### 2.2.2.1.2 Barrages à noyaux

Les barrages zonés sont d'une conception bien plus récente et moderne que les barrages simples en terre. Ils séparent les fonctions principales dans des matériaux distincts : [12] (Figure 2.6)

- Une zone centrale, appelée noyau, assure le rôle d'étanchéité. Placée au cœur du remblai, elle est constituée de matériaux argileux, imperméable. Le noyau est généralement d'épaisseur variable, plus épais à la base à cause des pressions interstitielles plus fortes. Il peut être vertical ou incliné ;
- Des recharges à l'amont et à l'aval du noyau en zone centrale, apporte la fonction de stabilité. Ces massifs plus perméables que le noyau, sont réalisés en enrochements, ou en terre plus grossière.

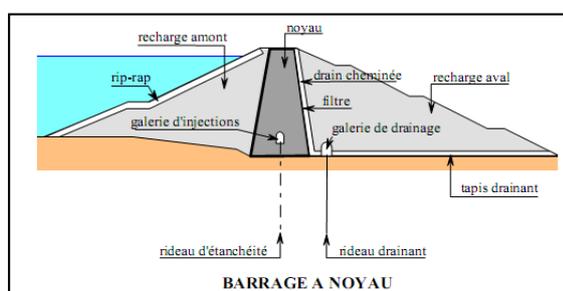


Figure 2.6 : Barrage a noyau

Pour éviter que les particules fines d'argile ne migrent dans les recharges sous l'effet des pressions d'eau qui règnent dans l'ouvrage et donc se prémunir contre des phénomènes d'érosion interne, le noyau est entouré de couches filtrantes. On utilise pour cela des matériaux dont la granulométrie spécialement étudiée est intermédiaire entre les tailles très petites des grains d'argile et les grains bien plus grossiers des recharges.

Le plus grand barrage du monde, Nurek au Tadjikistan, est un barrage en remblai zoné qui atteint 300 mètres de hauteur : la Tour Eiffel presque noyé sous une « montagne » en enrochements, Le record aurait dû être détenu par le barrage de Rogoun dans le même pays et qui devait atteindre 335 m.

Le record français appartient au barrage de Grand'Maison dans Isère avec 140 mètres de hauteur. Le volume considérable de matériaux à mettre en place à imposer l'ouverture de carrières spéciales, un découpage des recharges avec plusieurs types de remblai, il est suivi de près par celui de Serre Ponçon. [17] **Annexe 2**

### 2.2.2.2 Barrage en enrochement

Le corps du barrage est constitué de matériaux dont la caractéristique recherchée est la stabilité mécanique. Les enrochements permettant d'obtenir des pentes plus fortes, leur perméabilité (matériaux contenant très peu d'argiles) permet de réduire les pressions interstitielles. Les blocs peuvent atteindre des dimensions voisines du mètre. Ils sont mis

en place par un compactage puissant afin de limiter les problèmes de tassements différés (Figure 2.7)

Des très grands barrages en enrochement sont construits dans le monde, le plus haut du monde est celui de Chicoasen (Mexique) de 263 m de hauteur et d'un volume de 15 hm<sup>3</sup>. Il est suivi par celui de Chivor (Colombie) de 237 m de haut et d'un volume de 10,8 hm<sup>3</sup>. En France le plus important est le barrage du Grand-Maison (avec noyau en terre) de 160 m de hauteur et 16 hm<sup>3</sup> de volume. [40-48] **Annexe 2**

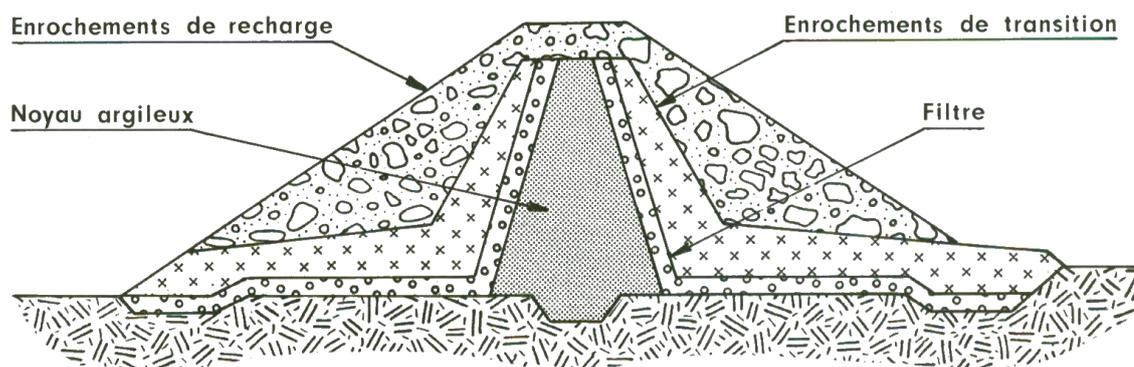


Figure 2.7 : Coupe d'un barrage en enrochement

Pour l'étanchéité, on utilise de plus en plus des membranes synthétiques (géomembranes) le plus souvent soudées, ou des revêtements en béton bitumineux, les revêtements en béton armé sont pratiquement abandonnés. Selon la nature des matériaux retenus pour le corps de barrage et l'étanchéité, on peut être conduit à interposer des couches de liaisons sous le masque pour assurer la régularité d'appui et le drainage d'éventuelles infiltrations.

Les barrages en remblai sont les mieux adaptés au contexte Africain à cause des plusieurs raisons on cite :

- Peuvent être fondés sur des substrats meubles.
- Peuvent être fondés sur des larges vallées.
- Capables de s'adapter à d'éventuels mouvements de leur substratum.
- Disponibilité des matériaux de construction.

Le caractère plus ou moins perméable des matériaux des barrages en remblai impose la nécessité d'un drainage artificiel pour évacuer les fuites éventuelles du revêtement et éviter les risques de sous pression, mais le problème ne sera pas résolu, donc il lui faut un organe étanche et économique qui assure l'étanchéité totale du barrage, qui permet le stockage de l'eau dans les conditions de service du projet particulier et éviter le problème de pressions.

### 2.3 Étanchéité du barrage en remblai

#### 2.3.1 Notion de l'eau dans le sol

L'eau se présente dans le sol sous différentes formes et on peut distinguer deux catégories soit que l'eau est liée ou libre. Dans la première catégorie on retrouve l'eau hygroscopique, l'eau pelliculaire et l'eau capillaire quant à la deuxième catégorie on y retrouve l'eau de gravité.

Parmi les paramètres qui caractérisent l'eau dans le sol, deux sont essentielles, le degré de saturation qui est le rapport entre le volume d'eau et le volume total occupé par les vides et le potentiel des forces de liaison de l'eau et du sol, qui représente l'énergie nécessaire pour vaincre les forces de liaison. [84]

### 2.3.2 Circulation de l'eau dans le sol

L'eau peut s'écouler à travers tous les sols mais le phénomène d'écoulement à une intensité très variable d'un sol à un autre. Cette intensité varie en fonction des vides entre les particules du sol et les frottements contre ces particules.

### 2.3.3 Les infiltrations dans les barrages en remblai

La présence d'une charge hydraulique à l'amont du remblai engendre une infiltration d'eau dans le barrage et ses fondations.

Lorsque le barrage est plein, les écoulements à l'intérieur du barrage se font de l'amont vers l'aval selon des lignes sensiblement horizontales qui tendent à entraîner le talus aval. On doit donc réduire les pentes ou insérer un drain en pied de barrage pour faire chuter les lignes d'écoulement. Lorsque le barrage subit une vidange rapide, le gradient hydraulique s'inverse, les pressions interstitielles ne pouvant pas s'évacuer rapidement dans un matériau peu perméable, on a alors un risque d'instabilité du talus amont qui peut être stabilisé par une recharge perméable (enrochement).

Le phénomène des fuites d'eau au niveau des barrages se traduit non seulement par des pertes considérables en eau précieuse mais menace aussi sérieusement la stabilité des ouvrages hydrauliques. De plus, rappelons que la perte de capacité due essentiellement aux fuites d'eau contribue également, à l'envasement des retenues et à l'évaporation intense lorsqu'ils sont implantés dans des régions chaudes. [84]

Le problème des fuites d'eau est très complexe car il menace les quantités d'eau accumulées dans la plupart des barrages à travers le monde et engendre une inquiétude sur la stabilité de ces ouvrages, sur tout si ce problème persiste. [84]

### 2.3.4 Stabilité hydraulique

Lorsqu'un terrain est traversé par un liquide, il subit des actions qui résultent de la présence du liquide en mouvement ou non dans ses interstices par conséquent ces terrains peuvent subir des dommages irréversibles.

On observe trois principaux mécanismes : le glissement, la submersion, et l'érosion interne. Ce dernier provient de la migration sous l'action d'un écoulement, de certains grains constitutifs de l'ouvrage. Cette migration est mal connue à cause de sa complexité et de sa difficulté à être détectée, elle engendre une modification des caractéristiques hydrauliques et mécaniques du matériau constituant l'ouvrage.

La perméabilité du matériau peut être considérablement modifiée, ce qui peut provoquer une perte d'étanchéité ou des surpressions interstitielles. L'arrachage de certains grains porte préjudice à la stabilité structurelle du matériau et peut même conduire à la rupture de l'ouvrage.

Les mécanismes responsables de l'érosion interne sont complexes et dépendent de plusieurs paramètres qui peuvent être couplés. D'une manière générale, la terminologie

employée pour caractériser l'érosion interne est variable et dépend des disciplines et des chercheurs. Selon la terminologie la plus courante, nous définissons les deux principaux phénomènes : le renard et la suffusions [84] :

- **Le renard**: est un phénomène qui provoque un arrachage progressif des particules de l'aval du sol vers un milieu extérieur et en progressant vers l'amont, jusqu'à la formation d'un conduit continu. La granulométrie du sol varie donc avec une augmentation de la perméabilité. Ce phénomène de renard est difficilement détectable et évolue très rapidement, ce qui laisse peu de temps pour agir. Généralement l'apparition du phénomène de renard dans les sols cohésifs est favorisée par des défauts de perméabilité.
- **La suffusion**: est un phénomène qui se traduit par une redistribution interne des particules fines dans le sol. La granulométrie globale du sol ne change pas, par contre la perméabilité diminue. Cette redistribution des particules provoque une surpression localisée en aval de l'écoulement et peut engendrer un glissement de sol. Généralement l'évolution du phénomène de suffusion est très lente, ce qui permet de la détecter et d'agir en conséquence.

### 2.3.5 Choix du système d'étanchéité

Quand le projeteur a fait choix pour un site donné d'un ouvrage de type digue en remblai, c'est en ayant constamment présent à l'esprit les problèmes qu'allaient poser les organes assurant l'étanchéité du massif. Les moyens qu'offre la technique moderne pour se prémunir contre toute infiltration à travers le massif sont nombreux et lorsque nous examinons bien le problème nous s'apercevons qu'il existe toujours au moins une bonne solution qui assure l'étanchéité du massif. On doit distinguer :

- l'étanchéité propre du barrage qui est liée à sa constitution, et donc peut aisément être maîtrisée et contrôlée.

- l'étanchéité du bassin de retenue qui dépend de la géologie du site (nature des terrains, état de fracturation, réseaux karstiques éventuels, ...), elle est établie lors du choix du site et peut éventuellement être traitée sur des zones de faible étendue.

- l'étanchéité de la liaison barrage - sol de fondation ; la zone de pied de barrage est celle des plus fortes pressions, et le terrain peut être en partie remanié lors de la construction de l'ouvrage, cette zone doit donc être contrôlée et traitée soigneusement.

Les organes d'étanchéité peuvent être classés selon :

- ✓ La position : amont ou centrale ;
- ✓ La rigidité : souple ou semi-rigide.

### 2.3.6 Différents types d'organes d'étanchéité

Les techniques couramment les plus mises en œuvre sont : les noyaux en matériaux argileux compactés, en béton bitumineux et les masques amont en béton de ciment ou béton bitumineux. Il existe néanmoins d'autres techniques tels que : paroi moulée, chapes et les membranes souples.

### 2.3.6.1 Noyaux

Le noyau est la partie assurant l'étanchéité. À cette fin, on utilise des sols contenant une forte proportion de particules fines et peu de gros éléments. La stabilité du massif sera assurée par des zones perméables appelées recharges. Ces recharges peuvent être au nombre variables et disposées différemment d'un barrage à un autre en fonction de la nature du matériau et des conditions spécifiques à chaque barrage.

Ce type de barrages présente toutefois l'inconvénient d'une mise en œuvre plus compliquée et onéreuse surtout si la vallée est étroite et où le travail mécanisé devient plus compliqué. Un autre inconvénient, est la nécessité de séparer par des filtres de transition les différentes zones.

#### 2.3.6.1.1 Noyau argileux compacté

Le noyau en matériau argileux compacté, disposé verticalement au centre du barrage ou en position inclinée à l'amont de celui-ci, son épaisseur est de l'ordre de 1/6 de la hauteur de l'ouvrage.

Vers le sommet le noyau doit être monté au-dessus des plus hautes eaux et pratiquement, compte tenu des remontées capillaires, jusqu'à la tête du barrage.

Il doit être protégé de la dessiccation à sa partie supérieure pour éviter toute fissure de retrait qui risquerait de se révéler catastrophique. (Figure 2.8)

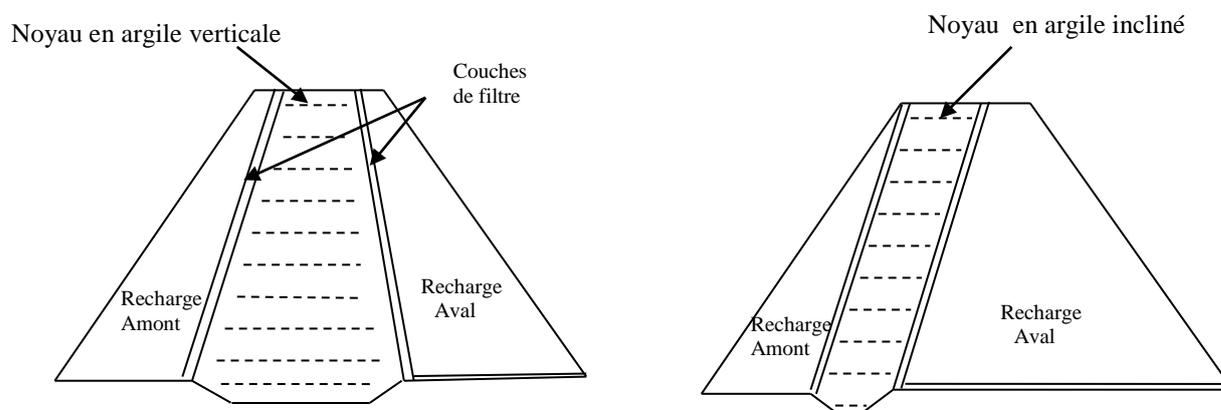


Figure 2.8: Noyau en argile vertical et incliné

#### 2.3.6.1.2 Noyau bitumineux

L'étanchement des barrages en remblai au moyen de noyaux bitumineux a pris une très grande importance dans le monde entier et dans toutes les zones climatiques ; cet élément d'étanchéité (mieux que la plupart des autres) satisfait, en effet, aux exigences de sécurité les plus strictes grâce à sa déformation, sa bonne résistance à l'érosion et au vieillissement, et surtout grâce au mode de construction sans joints.

### 2.3.6.2 Masque amont

Une couche d'étanchéité appelée masque posée à l'amont du massif en enrochement et qui s'appuie sur ce massif. Le masque est étanche sur toute sa surface. Un soin particulier doit être porté à ce que l'étanchéité soit aussi assurée sur la périphérie du masque aussi bien en pied de barrage et dans la fondation qu'en rive pour éviter que le masque ne soit contourné. (Figure 2.9)

La présence du masque en parement amont présente le double avantage de permettre des réparations en cas de dégradation du masque, mais aussi d'autoriser des vidanges de retenue très rapide.

De nombreux barrages à masque amont sont réalisés en enrochements. La qualité du compactage lors de la mise en œuvre du matériau a une grande influence sur les déformations et tassements ultérieurs.

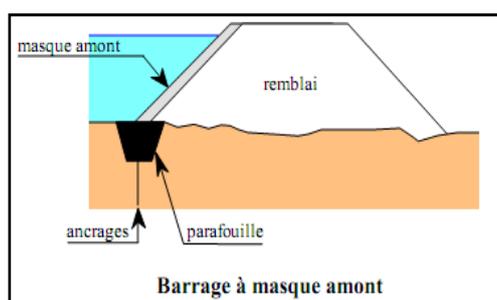


Figure 2.9: Coupe d'un barrage à masque amont

Le masque qui constitue l'organe d'étanchéité amont est classiquement réalisé en béton de ciment, en acier, en terre ou en béton avec des produits bitumineux

#### 2.3.6.2.1 Masque amont en béton de ciment

C'est le type de masque le plus ancien et qui est pratiquement abandonné à cause de sa rigidité qui s'accommode très mal des déformations du massif support.

En général il se compose de dalles préfabriquées ou coulées sur site avec des joints de dilatation qui atténuent l'effet des déformations du béton, ces joints sont respectivement parallèles et perpendiculaires aux lignes de plus grandes pentes du talus, ces dernières étant nécessaires pour diminuer l'importance des efforts de flexion. [84] (Figure 2.10)

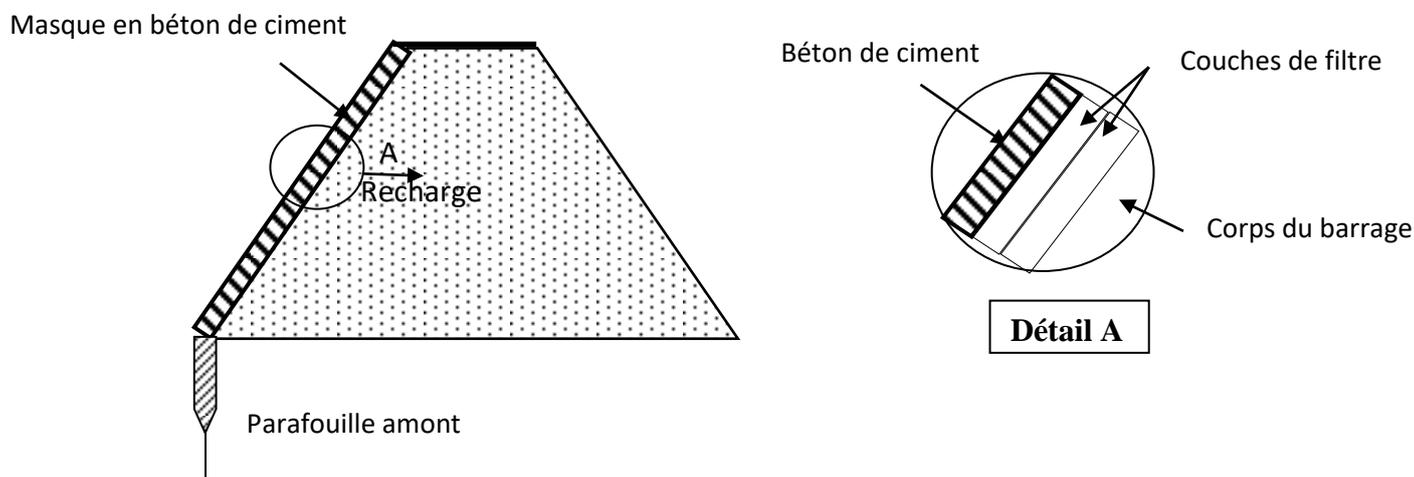


Figure 2.10 : Masque amont en béton de ciment

### 2.3.6.2.2 Masque amont en béton armé

Grâce aux travaux de Barry COOKE, les barrages en enrochements à masque en béton armé font l'objet d'une quasi-normalisation. Ils sont connus dans les mondes anglo-saxons sous l'acronyme CFRD (Concrete Faced Rockfill Dam). [17] (Figure 2.11) (Barrages de Gréziolles). Annexe 2

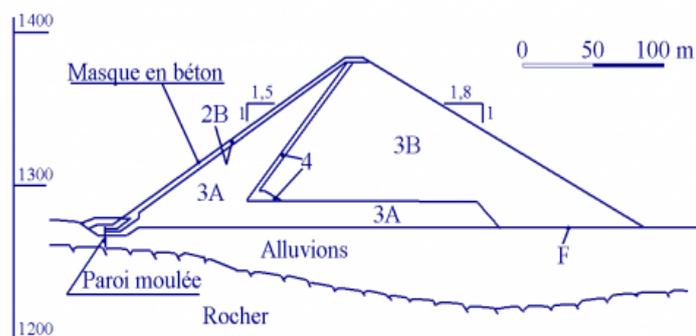


Figure 2.11 : Coupe du masque amont en béton armé

### 2.3.6.2.3 Masque amont en acier

En raison de la grande déformabilité alliée à une résistance élevée et une étanchéité parfaite de l'acier, celui-ci constitue un matériau techniquement à peu près parfait pour un masque amont. L'inconvénient en est généralement une question de coût. [48]

### 2.3.6.2.4 Masque amont en terre

Au moyen de terre argileuse compactée, nous pouvons réaliser une étanchéité convenable, avec des épaisseurs qui sont des caractéristiques de perméabilité du matériau dont on dispose.

### 2.3.6.2.5 Masques amont en béton bitumineux

C'est a priori le produit idéal en raison de sa remarquable étanchéité et de sa résistance à la flexion. Si certaines fissures se produisent, elles se colmatent d'elles-mêmes peu à peu sous l'effet de la pression de l'eau, par déformation plastique. Grosso modo, un béton bitumineux réagit de façon plastique aux déformations lentes, de façon élastique aux déformations rapides, or le tassement s'effectue en général de façon lente. Également, il n'y a pas de problème du joint, les différentes couches de béton bitumineux se soudent littéralement à chaud. (Figure 2.12) [17] (Barrage de Monnes). Annexe 2

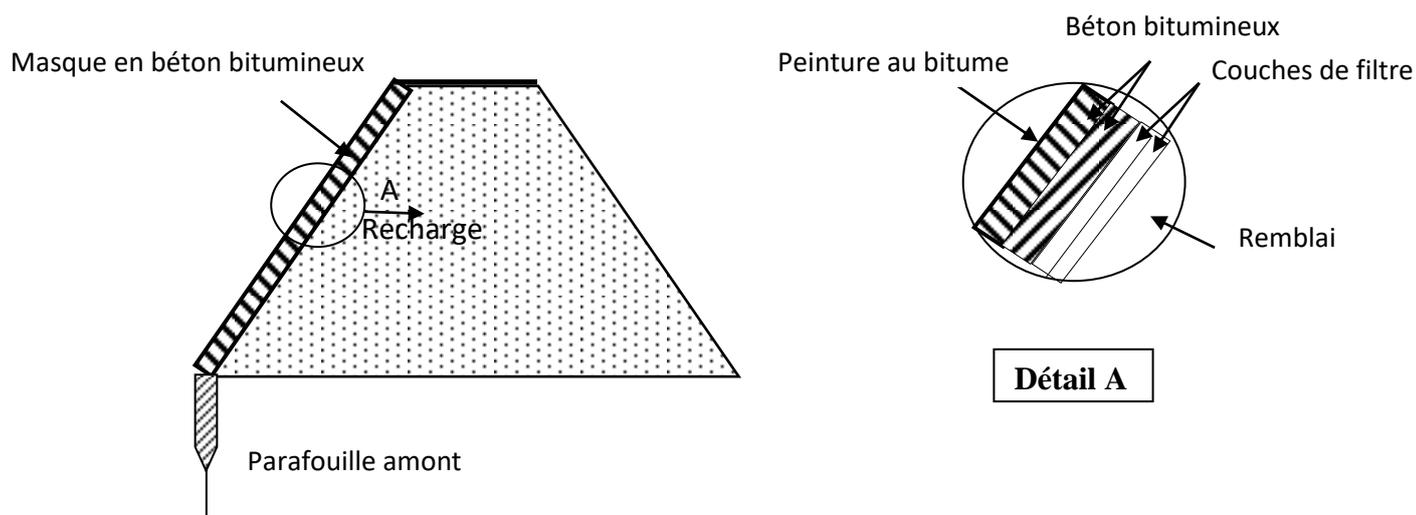


Figure 2.12 : Masque amont en béton bitumineux

### 2.3.6.2.6 Masque en membrane souple

Le masque en membrane souple est un procédé d'étanchéité relativement récent. Il présente l'avantage d'être très simple à réaliser et résistant physiquement et chimiquement, avec toutefois l'inconvénient d'être sensible aux chocs, aux poinçonnements et aux poussées des racines de végétaux. Pour la réalisation de ce type de masque les produits les plus utilisés sont :

- Les géomembranes bitumineuses : bitumes soufflés ou modifiés par ajout de polymères;
- Les géomembranes plastomères: PVC (polychlorure de vinyle), PEHD (polyéthylène haute densité);
- Les géomembranes élastomères : butyle caoutchouc, EPDM (éthylène propylène diène monomère) ;

Une bonne conception et une pose soignée permettent d'assurer une bonne tenue dans le temps de ce produit dont les premières applications datent de la fin des années 60. (Figure 2.13) [84]

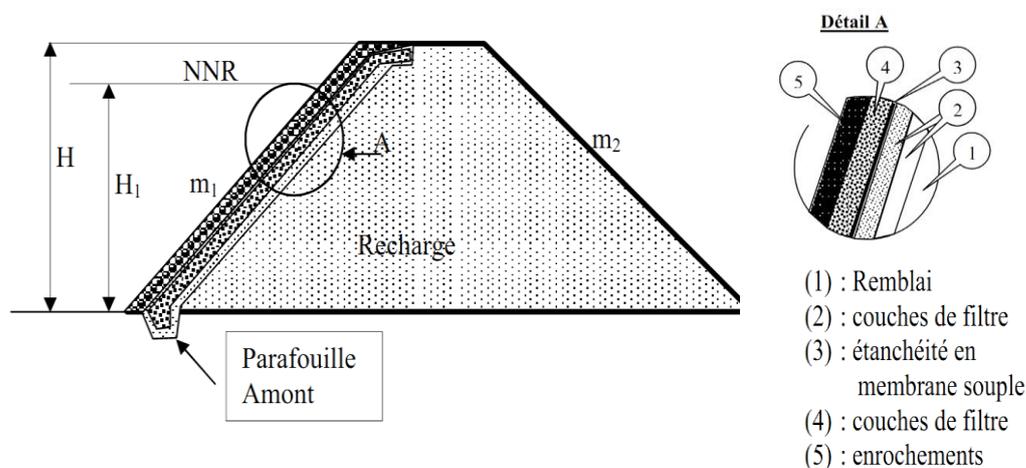


Figure 2.13 : Masque amont en membrane souple

Le barrage en enrochements de l'Ortolo (Haute Corse) mis en eau en 1996 représente avec ses 37 m de hauteur le plus haut barrage au monde avec étanchéité amont en géomembrane bitumineuse. **Annexes 2.**

Pour améliorer la sécurité du barrage, il n'est pas rare de trouver dans les barrages à masque amont d'autres matériaux fonctionnels :

- ✓ Un matériau de réglage ou de transition servant de support à l'étanchéité mince et la mettant à l'abri de tout poinçonnement par des éléments grossiers du massif support ;
- ✓ Une cheminée drainante, un tapis drainant ou les deux pour évacuer les eaux des infiltrations éventuelles à travers le masque ;
- ✓ Des matériaux de protection soient du parement aval (terre végétale engazonnée, enrochements, maçonnerie de pierres sèches, ...), soient du masque d'étanchéité comme des dalles de protection ou des pavés autobloquants mettant l'étanchéité mince à l'abri des agressions extérieures telles que la glace, les projectiles ou les chutes de blocs. [40-43]

### 2.3.6.3 Étanchéité des fondations des barrages

Lorsque les fondations du barrage sont imperméables, il suffit d'assurer la liaison entre le massif du barrage et sa fondation en réalisant un ancrage du dispositif d'étanchéité pour empêcher les infiltrations suivant la ligne de contact entre le barrage et sa fondation.

Dans le cas où les fondations sont perméables, leur traitement est indispensable pour les rendre étanches. Ce traitement est fonction de la nature des matériaux constituant et de leurs profondeurs.

#### 2.3.6.3.1 Clé d'étanchéités

C'est une tranchée remplie de matériaux assurant l'étanchéité du massif, qui doit recouper la couche perméable et s'ancrer dans le substratum imperméable. (Figure 2.14).

Cette solution est adoptée lorsque l'épaisseur de la couche imperméable n'est pas très grande car l'exécution de la tranchée et son remblayage se fait d'une manière mécanique. [84]

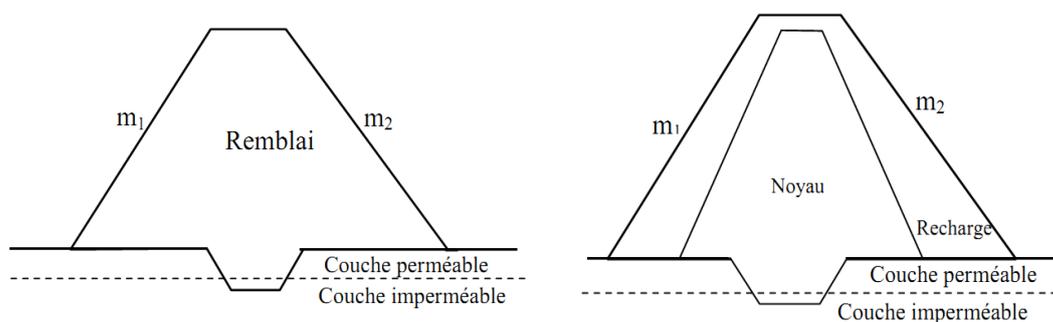


Figure 2.14 : Clé d'étanchéités

### 2.3.6.3.2 Paroi moulée

Le principe général consiste à mettre en place, une fois le remblai achevé, une paroi moulée centrale. Celle-ci traverse l'ensemble du remblai et la partie meuble de la fondation. Cette technique est envisagée dans les terrains meubles et dans les fondations rocheuses grâce à de nouvelles techniques appelées hydro fraise. Ce type d'étanchéité artificielle peut s'avérer avantageux comparé aux géomembranes, si les appuis du barrage sont très raides car le chantier de traitement de la fondation est alors compliqué. (Figure 2.15)

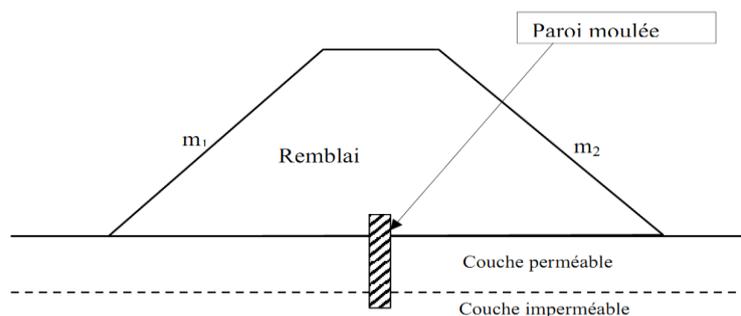


Figure 2.15 : Paroi moulée

### 2.3.6.3.3 Traitement des fondations par injection

Les injections sont utilisables aussi bien dans le cas d'une fondation meuble que dans celui de massifs rocheux plus ou moins fissurés. Les produits d'injection étant adaptés au matériau traité (coulis de bentonite et ciment, coulis spéciaux). La coupure comporte le plus souvent trois lignes de forages, comme l'injection ne peut être efficace en surface, soit on recoupe les premiers mètres injectés par une clé d'étanchéité, soit on traite à partir d'une certaine hauteur de remblai. (Figure 2.16).

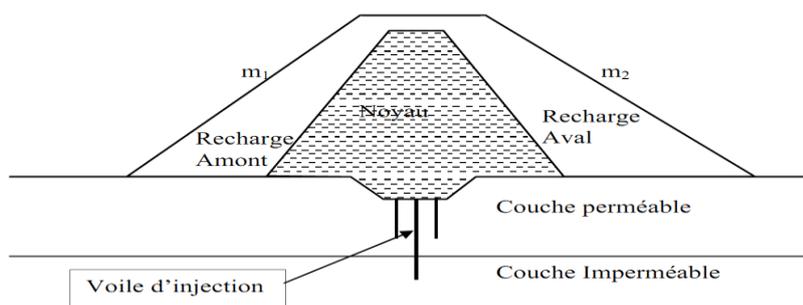


Figure 2.16 : Traitement des fondations par injection

### 2.3.6.3.4 Tapis d'étanchéité amont

Lorsque l'étanchéité de la retenue ne peut pas être réalisée par une coupure au droit du barrage, la solution consiste à étancher la cuvette totalement ou partiellement à l'aide d'un tapis en matériaux argileux compactés. On peut adjoindre aux

matériaux argileux des produits d'étanchéité, des polymères synthétiques et de la bentonite pour améliorer son efficacité. (Figure 2.17)

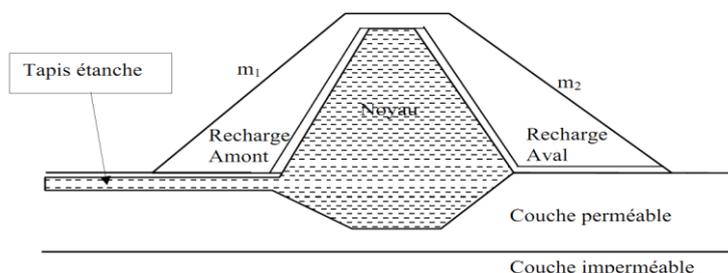


Figure 2.17 : Tapis d'étanchéité amont

### 2.3.7 Dispositions de drainage

La présence d'une charge hydraulique à l'amont du remblai engendre une infiltration d'eau dans le barrage et ses fondations, malgré l'attention accordée au dispositif d'étanchéité prévu, ces infiltrations peuvent être nuisibles à la stabilité tant hydraulique que mécanique de l'ouvrage. Pour y remédier on prévoit des dispositifs de drainage souvent associé à des filtres.

#### 2.3.7.1 Les drains

Le drain est un organe fortement perméable incorporé dans le barrage. Il est généralement constitué de graviers et d'enrochements avec des caractéristiques de non-altération au contact de l'eau et résistant aux grandes compressions. Il est admis que la présence de drain dans les barrages en terre est indispensable pour leur stabilité. Parfois le drain classique est remplacé par des tuyaux poreux ou perforés en matière souple ou rigide. On utilise également de plus en plus des géotextiles pour assurer le drainage des petits barrages.

Les drains dans les barrages en terre ont une multitude de fonctions très importantes :

- Intercepter les eaux d'infiltration et les évacuer à l'aval du barrage.
- Abaisser la ligne de saturation et éviter les résurgences sur le talus aval.
- Abaisser la ligne de saturation, pour garder une grande partie du remblai non saturé afin de conserver les caractéristiques géotechniques du matériau utilisé.
- La présence du drain dans un barrage en terre sert à minimiser le débit de fuite sur l'ouvrage, il sert aussi à décompresser la fondation et donc à minimiser les pressions interstitielles.
- La présence du drain permet d'activer la consolidation du remblai.

On rencontre plusieurs types de drainages qui diffèrent les uns des autres par leurs formes constructives, leur emplacement dans le barrage et le rôle pour lequel ils ont été prévus.

### 2.3.7.2 Les filtres

Les filtres sont de minces couches successives de matériaux perméables dont la grosseur des éléments augmente dans la direction de l'écoulement. Ces filtres doivent assurer une transition entre une couche à granulométrie donnée vers une couche à granulométrie plus grossière. Si un filtre est constitué par plusieurs couches chacune doit jouer le rôle de filtre vis-à-vis de la précédente.

Le rôle des filtres est très important dans le fonctionne d'un barrage en terre, particulièrement sur le plan de la sécurité de l'ouvrage, ainsi ils peuvent jouer de nombreuses fonctions complémentaires les unes aux autres, parfois les filtres peuvent jouer le rôle de drains surtout dans les petits barrages. Parmi leurs rôles on peut citer:

- Entreposés entre deux couches à granulométrie différente, ils évitent que les grains fins de la première couche ne soient entraînés par les eaux d'infiltration à travers les matériaux de gros diamètres.

- Entreposés de part et d'autre d'un noyau d'étanchéité ou sous un écran d'étanchéité, ils jouent le rôle de couches drainantes en évacuant les eaux d'infiltration vers l'aval du barrage.

- Intercalé entre un massif de barrage et sa fondation, si elle est argileuse, contribue grandement à activer sa consolidation grâce à leur rôle drainant qui réduit les pressions internes.

Les filtres sont constitués de sables et de graviers dont les grains sont insolubles et non altérables en présence de l'eau. Ces dernières années les filtres granulaires sont de plus en plus remplacés par des géotextiles qui sont des produits industriels très économiques et faciles à mettre en œuvre.

Les filtres, pour être efficaces ne doivent pas se colmater ni se dégrader par entraînement de leurs propres grains. Ils doivent jouer le rôle pour lequel ils sont prévus à savoir éviter que les particules fines du matériau de base ne soient entraînées à travers les vides des couches perméables.

On peut dire que les filtres et les drains sont des organes indispensables pour le bon fonctionnement des barrages, mais leur efficacité est étroitement liée à leur dimensionnement et au choix de leur emplacement.

## 2.4 Conclusion

Le problème de l'étanchéité du massif se pose chaque fois que le calcul des infiltrations en superstructure indique des pertes inadmissibles. Ces pertes peuvent soit entraîner la ruine de l'ouvrage par formation de renard, soit encore, sans nuire à sa sécurité, être gênantes pour l'exploitation du barrage, et malgré l'optimisation des débits de fuite, le problème des pressions hydrostatiques interne reste un problème majeur, un organe d'étanchéité donc est indispensable.

Le masque amont présente un avantage au point de vue constructif, c'est qu'il peut être réalisé indépendamment du massif. Ceci est important, car le massif doit être mis en place avec de gros moyens, pour être économique, alors que le masque est un organe relativement délicat, lent à mettre en œuvre. De plus, étant mis en place avec du retard par rapport au massif, une partie du tassement de ce dernier est déjà faite.

Le masque central est à l'abri des intempéries et des variations de température, avantage largement compensé s'il n'est pas en terre par l'impossibilité quasi totale de réparations ultérieures. De plus, le chantier de déversement d'enrochement est dédoublé, l'amont et l'aval, les deux chantiers ne pouvant progresser que parallèlement à quelques mètres près, car le masque central ne peut supporter latéralement des charges importantes. Actuellement, le masque central est toujours en terre, les autres matériaux possibles étant abandonnés du fait de leur rigidité.

Dans ce chapitre nous avons expliqué comment choisir un organe d'étanchéité pour un barrage en remblai en se basant sur les conditions économiques. Dans le chapitre suivant nous allons étudier l'étanchéité du barrage en remblai par un masque en béton bitumineux.

## **Chapitre 3**

# **Étanchéité par le masque en béton bitumineux**

### 3.1 Généralité

Les masques en béton bitumineux sont souvent utilisés comme disposition d'étanchéité sur le parement amont des barrages en remblai en remplacement des dalles en béton, des masques en béton projeté, des feuilles métalliques, des géomembranes, des revêtements en terre ou en sol-ciment. Le masque bitumineux remplace aussi le noyau en terre à grains fins ou autres type d'écran d'étanchéité placé à l'intérieur du barrage est servi également à protéger le parement amont du barrage contre l'action des vagues et des vents. (Figure 3.1)

La plupart des barrages en remblai et des réservoirs avec revêtement en béton bitumineux ont été construits en Europe. Un tiers environ des barrages est situé à moins de 500 m d'altitude ; toutefois, il existe une douzaine d'exemples de barrage de ce type, construits dans des climats rigoureux, au-dessus de 2000 m d'altitude. [36]

L'expérience montre qu'il faut considérer le béton bitumineux comme un revêtement souple qui recouvre le support et doit d'être capable de suivre ses déformations sans perdre sa qualité fondamentale d'étanchéité. Dans ces conditions son épaisseur tout en restant suffisante, est moins déterminante que sa composition et son aptitude à la déformation, en effet dans la partie à forte pression l'étanchéité doit être obtenue par un coefficient de perméabilité faible plutôt que par une surépaisseur ; alors que la qualité du béton bitumineux a une influence considérable sur les infiltrations. Par contre l'épaisseur du béton bitumineux étanche influence la stabilité au fluage sur la pente. [20]

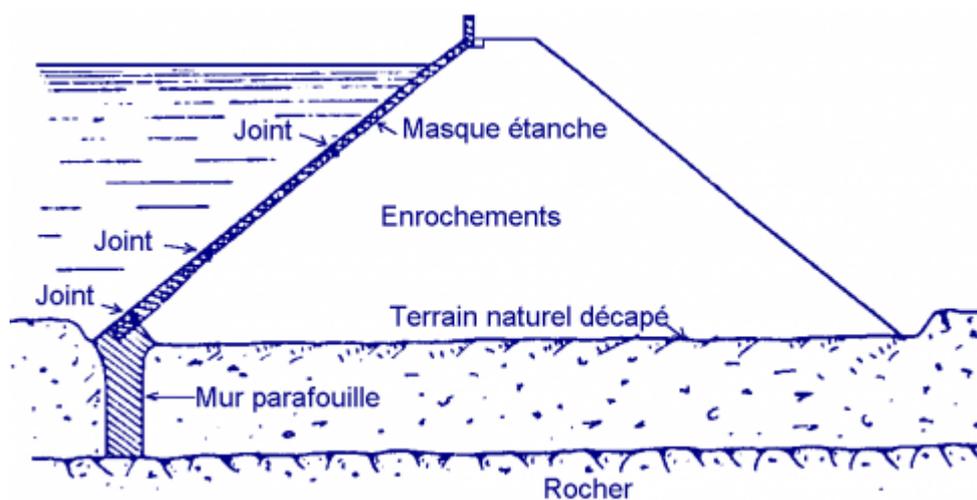


Figure 3.1 : Barrage en remblai avec un masque amont en béton bitumineux

Généralement, les règles pour les bétons bitumineux étanches destinés aux revêtements des canaux sont applicables également pour les masques amont des barrages, il y a lieu cependant de tenir compte des conditions particulières aux barrages dont les principales sont : [20]

1. Mise en œuvre par bande transversale, et sur de grande longueur de rampant.
2. Tassement éventuel du corps de barrage exigeant un masque d'étanchéité ayant une bonne aptitude à la déformation sans fissuration.
3. Grande sécurité de l'étanchéité sans risque de fluage en tenant compte des conditions particulières d'exploitation : marnage, vidange journalière pour les bassins de pompage, charge d'eau, longueur des talus, exposition au soleil, formulation de glace, etc.

#### 3.2 Évolution des masques en béton bitumineux

Les premiers exemples (jusqu'à environ 1950) sont fortement inspirés par la construction des routes. Les masques de quelques-uns des barrages les plus anciens comprennent une structure composite dans laquelle la partie traitée avec le bitume, utilisée soit en pénétration dans des couches graveleuses, soit un véritable béton bitumineux préparé à chaud, assurent la fonction de l'étanchéité, le drainage et la protection étant réalisés par des couches de béton de ciment de diverses caractéristiques. Le béton bitumineux était généralement placé à la main sur des pentes excédant 1:1 et moyennant l'utilisation des moyens nécessaires pour maintenir le mélange en place.

Par suite, les pentes ont été réduites (max 1:1,5 ; 1:1,7) et les méthodes de mise en place et de compactage ont été améliorées ; le masque consiste en une série de couches de béton bitumineux qui assurent les divers fonctions nécessaires ; elles reposent sur un support généralement non traité au bitume consistant en un filtre en agrégats pour les barrages en terre ou en enrochement de petites dimensions (8 à 15 cm) et sur une simple couche d'égalisation pour les barrages en enrochement. Ces revêtements peuvent se classer en deux familles distinctes : [40- 48]

##### Type A

Ou type bicouche, le revêtement consiste en une structure en "Sandwich" comprenant une couche de béton bitumineux drainante comprise entre deux couches de béton bitumineux dense. Le revêtement externe est généralement fait en deux couches. Cette structure en "Sandwich" est superposée à un drainage en béton bitumineux ouvert ou à une couche de liaison suivant le cas. (Figure 3.2). Les raisons de ces dispositions, utilisées pour la première fois en 1952 (Genkel, Allemagne) sont la collecte et la mesure des infiltrations.

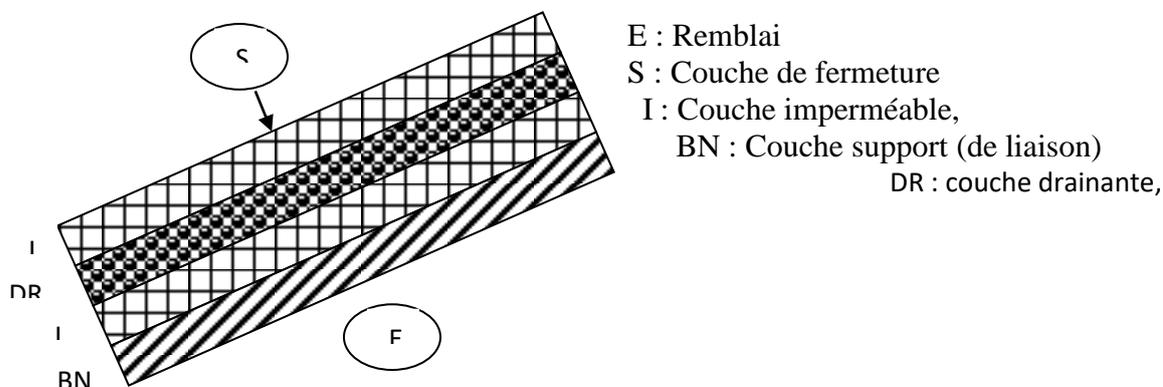


Figure 3.2 : Masque d'étanchéité type A

### Type B

Ou type monocouche, un drainage en béton bitumineux ouvert et une couche de liaison supporte généralement deux couches de béton bitumineux denses imperméables dont les joints sont alternés. L'ensemble repose sur une couche de réglage du parement amont Voir (Figure 3.3), Montgomery (Etats-Unis, 1957) a conçu le premier exemple du type B.

E : Remblai  
S : Couche de fermeture  
I : Couche imperméable,  
BN : Couche support (de liaison).

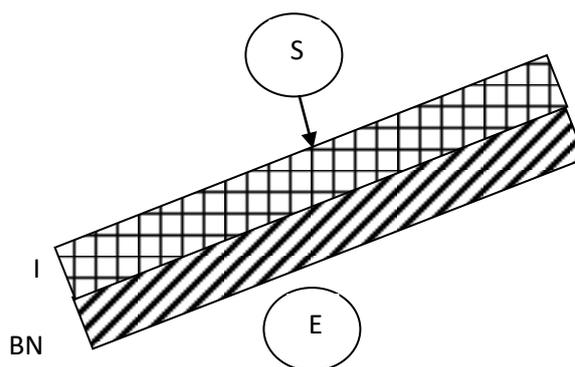


Figure 3.3 : Masque d'étanchéité type B

### 3.3 Constitution des bétons bitumineux

Les formules de béton bitumineux pour les masques de barrage doivent donc offrir le maximum de garanties sur des points particuliers. Les fourchettes de fabrication, de température et de compactage à la mise en œuvre seront les plus larges possible tout en garantissant l'étanchéité sans que les risques de fluage sur pente soient sensiblement augmentés.

La formulation en laboratoire s'inspire aujourd'hui des directives suivantes : [20]

- 85 à 90 % de matière concassés : gravillon et sable de concassage de préférence d'origine calcaire ;
- 10 à 15 % de sable fin roulé : son rôle est d'améliorer la maniabilité et de corriger la courbe granulométrique du concassé généralement pauvre en élément 0.1/0.5 mm ;
- La teneur totale en filler est de 13 à 15 %, le filler d'appoint doit être sélectionné : origine calcaire.
- Utilisation de bitume au dosage de 8 à 9 parties en poids pour 100 parties d'agrégats.

Ces essais du laboratoire pour la mise au point de la formule doivent en particulier porter sur les points suivants :

### 3.3.1 L'étanchéité

- Le pourcentage de vides inférieure à 2.5 % pour une pression de compactage de 15 à 30 bars sur éprouvettes.
- Perméabilité mesurée au perméamétrie :  $5.10^{-10}$  m/s ou moins sur éprouvettes de même épaisseur que le revêtement.

### 3.3.2 Les caractéristiques mécaniques

- Résistance au fluage sur pente.
- Essai type E.D.F sur des plaques de 40x20 cm d'épaisseur égale à celle du revêtement, placées sur un support ayant la pente du talus du barrage et mises à l'étuve à 70°C.
- Flexibilité : mesure à 0°C de la flèche en fonction du temps, sur des barreaux de l'épaisseur d'une couche de béton bitumineux, posés sur deux appuis distants de 50 cm.

### 3.4 Exécution des revêtements bitumineux

La longueur des talus, généralement supérieur à 30 m, impose une mise en œuvre par bandes transversales suivant la plus grande pente, à l'aide d'un finisseur tracté depuis la crête. L'étanchéité parfaite du revêtement en partie courante n'est obtenue que par respect les prescriptions suivantes : [20]

- a. Mise en place de l'enrober à une température voisine de 160 °C.
- b. Cylindrage de l'enrober à une température supérieure à 130°C.

L'homogénéité de l'enrober, le répandage et le cylindrage à forte température, la qualité du support, est la seule moyenne de s'opposer à l'existence d'une variation des pourcentages de vides sur toute la hauteur de chacune des couches. L'adhérence entre les deux couches étanche est une nécessité pour la pérennité du revêtement bicouche.

Les méthodes de construction modernes et la conception actuelle de la composition des enrobés permettent la mise en place de masques, en béton bitumineux sur des talus aussi raides que ceux exigés par d'autres facteurs.

Des masques en béton bitumineux ont été adoptés avec succès comme barrières étanches sur des barrages atteignant 90 m de hauteur, et l'expérience actuelle ne met pas de limites à la hauteur des barrages sur lesquels ce système pourrait être sûrement et efficacement utilisé, par contre, ces masques, qui sont des éléments structuraux minces, sont exposés à des gradients hydrauliques très élevés et peuvent être endommagés par des actions externes. Des tassements différentiels et des tractions le long de leur périmètre, l'action du gel, des rayons ultra-violets et des chocs mécaniques peuvent causer des dommages. Les masques et les barrages qu'ils protègent doivent donc être soigneusement conçus, construits et exploités.

### 3.5 La couche imperméable

A part de rares exceptions, on adopte les structures de deux types : le Type A, bicouche, et le type B, monocouche.

Le masque du type A réduit la probabilité que le remblai soit affecté par l'eau du réservoir, ce qui augmente le niveau de sécurité global du barrage. Pour cette raison, un système bicouche devra être toujours recommandé dans des cas spéciaux, à savoir dans les cas de barrages de très grande hauteur, de barrage en zone sismique, de barrages situés sur des sols extrêmement compressibles. Naturellement, un système bicouche (Type A) coûte plus cher qu'un masque monocouche (Type B). [48]

En cas de fissuration du revêtement externe, un système de revêtement bicouche bien conçu assurera la dérivation des fuites en dehors du corps du barrage.

Dans la solution du type A, seule la couche supérieure doit être considérée comme barrière d'étanchéité réelle. La couche imperméable interne est prévue pour protéger le remblai contre la saturation et l'érosion et pour servir de limite à la couche de drainage, afin que l'infiltration puisse être contrôlée.

La couche interne présente généralement la même composition et la même épaisseur que la couche externe, mais en principe, elle pourrait avoir des caractéristiques différentes et peut-être moins rigoureuses. [36-37]

Le problème de la compatibilité entre le masque étanche et le matériau du remblai ne réside pas tant dans la granulométrie des matériaux du remblai que dans la façon dont ce matériau est mis en place et dans la manière dont le masque résistera aux déformations importantes sous la charge d'eau.

### 3.6 Rôle du masque étanche

Pour pouvoir remplir les fonctions de barrière étanche, un masque en béton bitumineux, convenablement conçu et exécuté, doit remplir les conditions suivantes [36] :

1. Faible perméabilité pendant toute sa durée de vie.
2. Étanchéité des raccordements entre le masque et le socle, entre le socle et le para fouille et entre le masque et les ouvrages annexes, tels qu'évacuateur de crue, prise d'eau.
3. Flexibilité suffisante, afin que les déformations imposées par le remblai ne provoquent pas de fissurations. Cette condition est également valable pour les raccordements entre le masque et les éléments périphériques rigides, tels que le socle et également entre le masque et les ouvrages annexes où les tassements différentiels importants peuvent se produire.
4. Grande capacité d'allongement sous l'effet de tractions ; cette capacité a tendance à diminuer avec le temps si le vieillissement du béton bitumineux n'est pas convenablement maîtrisé.
5. Bonne adhérence du masque à la surface support du remblai.
6. Maîtrise du drainage et de l'érosion dans le cas de percolations à travers le masque.
7. Bon drainage sous le système de masque pour maîtriser la pression d'eau résultant de fuites.
8. Stabilité à la surface du support pendant la construction, lorsque le mélange de bétons bitumineux est encore chaud et déformable et au-dessus de la gamme des températures de service.
9. Résistance au vieillissement dans les conditions environnementales spécifiques au site.

10. Le projet du masque devra tenir compte des forces exercées par l'action des vagues et, le cas échéant, des forces sismiques.

### **3.7. Caractéristiques mécaniques et physiques du masque étanche**

La couche imperméable doit être étanche et stable, l'étanchéité dépend de la granulométrie des granulats, du pourcentage de liant bitumineux et du compactage. La stabilité dépend du type de bitume, du pourcentage des vides après compactage et de la granulométrie des granulats, une masse volumique de 2.01 à 2.5 t/m<sup>3</sup> associées à un niveau élevé de compactage, conduit à un mélange qui ne contient pas plus de 3 pourcents environ de vides. La proportion de vides du mélange mis en place pour le masque, a une grande influence sur la tenue au vieillissement.

D'autre propriété physique du mélange bitumineux, telle que la rigidité, la durabilité, la déformation permanente, la résistance à l'arrachement et à la rupture, la maniabilité, etc.

### **3.8 Comportement du masque étanche**

Bien que de nombreux barrages avec masque amont en béton bitumineux aient de bons comportements et qu'on n'ait pas enregistré d'incidents, il y a un certain nombre de dégâts survenus à des masques, ce qui fournit des enseignements pour l'amélioration des projets futurs. Ces dégâts peuvent être classés en deux groupes : Ceux qui ont lieu lors du premier remplissage du réservoir et qui se rapportent à une déformation excessive et ceux qui se développent par la suite au cours de la période d'exploitation de la structure et sont souvent dus au vieillissement. [36]

L'une des périodes les plus critiques de la vie d'un masque est celle du premier remplissage. Sous la charge d'eau, le masque se déforme avec le remblai et peut subir une contrainte excessive et se fissurer. Les causes principales de déformation excessive sont le tassement du remblai et l'affaissement de la fondation. La première cause est la plus fréquente, mais avec les techniques modernes de constructions des remblais en couches compactées relativement minces, on élimine généralement le problème.

#### **3.8.1 Problèmes structuraux**

Des problèmes structuraux peuvent se traduire par une rupture, des fissures de traction et des déchirures de la couche imperméable ou du masque tout entier. Ils peuvent causer de sérieuses infiltrations susceptibles de menacer la sécurité du barrage. Ces problèmes sont souvent liés à des discontinuités au raccordement entre le remblai ou autres ouvrages annexes.

#### **3.8.2 Problèmes relatifs au bitume**

Les problèmes associés au bitume concernent essentiellement le désenrobage et l'instabilité sur la pente. Un mauvais mélange peut résulter de l'eau qui sépare le bitume des granulats (désenrobage). Ce manque d'adhérence convenable peut être imputé à la paraffine contenue dans le bitume, ou à une teneur en bitume trop faible, ou à des granulats qui n'ont pas été suffisamment séchés au moment de l'opération de malaxage, ou encore à la présence de certaines substances naturelles ou artificielles recouvrant les granulats et

empêchant leur adhérence. Les mauvais mélanges sont évités lorsqu'on porte attention aux spécifications relatives aux matériaux et aux opérations de malaxage.

L'instabilité sur le talus peut résulter du fluage causé par une teneur en bitume trop élevée. La teneur en bitume appropriée dépend de la superficie des granulats. La quantité de bitume doit être seulement suffisante pour recouvrir entièrement toutes les particules des granulats et du filler.

Dans un mélange bitumineux, la déformation à la rupture augmente avec la température et décroît quand le taux de déformation augmente. Des changements radicaux de température entre le jour et la nuit entraîneront des inversions de déformation qui provoqueront des fissures de fatigue sur une paroi exposée. Pour y remédier, il faut utiliser un mélange plus souple ou même appliquer un matériau d'isolation.

#### 3.8.3 Problèmes de vieillissement

Les principaux facteurs responsables de l'oxydation du bitume, tant à haute température qu'à plus basse température, dans les différents procédés de mise en œuvre, sont les suivants [70- 53]:

- **le climat** : la vitesse d'oxydation augmente avec la température et les rayons ultraviolets accélèrent le vieillissement en surface :

- ✓ La lumière : l'exposition de bitume à la lumière induit des réactions de photo-oxydation qui produisent les mêmes effets que les réactions d'oxydation par l'oxygène il faut cependant noter que les radiations lumineuses ne pénètrent le bitume que de quelques micromètres. [8-109]
- ✓ La température : une augmentation de température accélère la diffusion de l'oxygène et apporte une partie de l'énergie d'activation des réactions d'oxydation. La température peut aussi être responsable de l'évaporation des substances les plus volatiles du bitume.
- ✓ L'eau : l'eau à l'état liquide ou gazeux favorise la dégradation du bitume. Elle peut être décomposée en agents oxydants par des radiations ionisantes. Elle entraîne les produits de dégradation solubles dans l'eau. [62-63]
- ✓ L'oxygène : à des températures peu élevées ou ambiantes, l'oxygène est chimiquement lié au bitume. L'oxydation se manifeste par la formation d'un film dur protecteur qui réduit la diffusion de l'oxygène dans les couches sous-jacentes. La profondeur à laquelle pénètre l'oxygène dépend de la vitesse de diffusion et de la vitesse de réaction. [63]

- **la nature du bitume**, en particulier sa réactivité vis-à-vis de l'oxygène.

Deux facteurs concourent à un vieillissement physique réversible : le refroidissement et la cristallisation de paraffines.

L'évaporation des fractions les plus volatiles du bitume peut constituer un autre type de vieillissement physique, celui-là est irréversible. La vitesse d'évaporation dépend de la nature, de la quantité des produits volatils et des conditions de traitement.

En général, les effets de vieillissement causés par les agents atmosphériques sont seulement superficiels et la surface peut être restaurée. Un revêtement de fermeture doit être prévu sur toutes les surfaces qui ne sont pas submergées en permanence, afin de les préserver des effets de vieillissement par les rayons ultra-violet. Les dépenses se rapportent généralement à l'entretien et à la réhabilitation, ou restauration, du revêtement de fermeture. Ces frais dépendent du climat local, de l'exploitation du réservoir et de l'exploitation à la lumière directe du soleil.

Le revêtement de fermeture est prévu pour protéger les couches sous-jacentes contre les agents causant le vieillissement. Quand la conception a été bien établie, les couches sous-jacentes peuvent avoir une très longue durée de vie. Par conséquent, à condition que tous les autres facteurs soient normaux, le maintien d'un revêtement en bon état et pour une longue vie ne réclame que vigilance et soins appropriés.

#### **3.9 Conclusion**

Un masque en béton bitumineux, adopté comme barrière étanche sur un barrage en remblai, est souvent compétitif, sur les plans des coûts, par rapport à d'autres dispositions plus classiques, tel que noyau en terre, ou autres solutions de remplacement comme un masque en béton armé, ou un écran interne d'étanchéité en béton bitumineux.

Par rapport à un noyau en terre ou à un écran interne d'étanchéité, un des éléments significatifs de la compétitivité réside dans le fait que, lorsqu'une barrière étanche convenablement drainée est située sur le parement amont, le remblai peut être conçu sans tenir compte de la pression interstitielle, ni des effets d'une percolation permanente ou d'une vidange rapide.

Un autre avantage offert par le masque amont en béton bitumineux est que, après une vidange du réservoir, il est facile d'inspecter le masque, de l'entretenir et de le réparer le cas échéant.

Par rapport aux masques en béton armé, les masques en béton bitumineux offrent l'avantage de pouvoir s'adapter à une déformation raisonnable de la recharge amont sous l'effet de son propre poids et de la charge d'eau du réservoir, suite à la consolidation de la fondation. De plus, l'expérience courante indique que les masques en béton bitumineux ne sont que modérément affectés par les secousses sismiques.

Dans ce cas, on peut dire que le masque amont en béton bitumineux est l'organe d'étanchéité le plus facile à réaliser et le plus économique.

Dans le chapitre suivant nous allons donner un aperçu sur l'expérience algérienne dans l'utilisation des masques étanches en béton bitumineux.

## **Chapitre 4**

### **L'expérience algérienne dans l'utilisation des masques en béton bitumineux**

#### **4.1. Introduction**

Les revêtements bitumineux ont fait l'objet d'un développement important dans le monde au cours des quinze dernières années, particulièrement dans le domaine des revêtements de canaux. La réalisation des barrages et des bassins permet aussi de dégager une doctrine en matière de masques imperméables.

La technique des masques d'étanchéité bitumineux a fait un grand progrès dans le monde, les caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux sont maintenant mieux connues et les matériels de fabrication et de mises en œuvre permettent un travail précis avec un rendement acceptable.

Des autres progrès doivent être apportés, car la réalisation du masque bitumineux demande beaucoup de soins, de contrôles et une spécialisation poussée des entreprises exécutant le travail. C'est pour quoi les recherches continuant dans le but d'élargir au maximum les fourchettes de fabrication et de difficultés à la mise en œuvre, dont les principales sont les contraintes de température au compactage et le problème du fluage sur la pente. [20]

#### **4.2 L'expérience Algérienne**

L'Algérie possède une ancienne expérience des masques d'étanchéité amont en béton bitumineux, des ouvrages de ce type ont notamment été réalisés au barrage Ghrib (1926 – 1938), au barrage de Bouhanifia (1930 – 1941) et au barrage de Sarno (1947 – 1954). [9]

##### **4.2.1 Barrage Ghrib**

Le barrage de Ghrib est construit entre 1926 et 1938 par une digue en enrochement, cela été des premiers barrages en enrochement réalisé avec un masque amont en béton bitumineux, cette solution est adoptée après des ruptures qui avaient affecté plusieurs masques en béton à cause de la déformation du massif. (Figure 4.1)

Le masque de barrage Ghrib est composé de :

- Un support.
- Une couche drainante de 8 cm d'épaisseur en béton poreux de ciment.
- Deux couches étanches en béton bitumineux de 6 cm d'épaisseur chacune.
- Un avant masque qui assure la protection thermique du béton bitumineux formé de dalles en béton poreux de 10 cm d'épaisseur, solidarisées par un grillage métallique suspendu au couronnement du barrage.

Le masque réalisé s'est comporté de façon satisfaisante jusqu'en 1953 date depuis là quels des désordres se sont produits à plusieurs reprises.



Figure 4.1 : Barrage Ghrib

#### **4.2.2 Barrage Oued Sarno**

Le barrage du Sarno est construit entre 1947 et 1954 sur l'Oued du même nom, affluent de la Mekerra qui prend sa source dans les montagnes de Daia et se termine dans les marais de la Macta. Le barrage du Sarno réalisé pour augmenter les ressources en eau du périmètre du SIG, la nature du terrain impose le choix d'une digue souple en terre homogène de 28 m de hauteur. L'étanchéité du barrage est assurée par un masque amont en béton bitumineux constitué de :

- Un support.
- Une couche drainante de 8 cm d'épaisseur en béton poreux de ciment.
- Deux couches étanches en béton bitumineux de 6 cm d'épaisseur chacune.

Depuis son achèvement, le masque du Sarno donne entièrement satisfaction puisque à retenue pleine les fuites sont négligeables.



Figure 4.2 : Barrage oued Sarno

#### **4.2.3 Barrage Ighil Emda**

Le barrage de l'Ighil Emda est construit au confluent de deux oueds, l'Oued Berd et l'Oued Embarek qui forment l'Oued Agrioun à 2 km au sud de Kherrata, à 18 km de la côte du golfe de Bougie. C'est un barrage fixe créant une retenue de 160.106 m<sup>3</sup> destinés à produire de l'énergie électrique. (Figure 4.3)

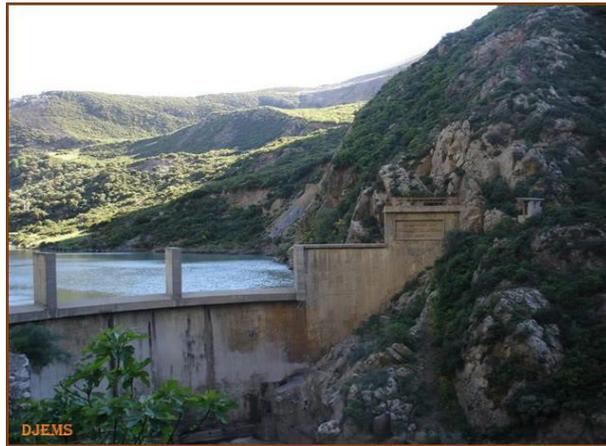


Figure 4.3 : Barrage Ighil Emda

#### 4.2.4 Barrage Bouhanifia

Le barrage de Bou-Hanifia est construit sur l'oued El Hammam qui prend sa source dans les montagnes de Daïa et se termine dans les marais de la macta. Le bassin versant du barrage a une superficie de **7.850 km<sup>2</sup>** et le débit annuel moyen de l'oued atteint **110 millions de m<sup>3</sup>**. (Figure 4.4).



Figure 4.4 : Barrage Bouhanifia

Au site du barrage, le substratum général est constitué par des marnes grises verdâtres homogènes compactes et étanches de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur qui appartiennent aux miocènes moyens.

La compressibilité des terrains de fondation devait faire exclure tout type de barrage rigide et laissait seulement le choix entre un ouvrage en terre et un ouvrage en enrochements ce dernier a été retenu pour des raisons de sécurité et aussi qu'étaient plus faciles de trouver aux environs du site des matériaux pierreux que des terres aptes au compactage. [28-81-108]

**Les principales caractéristiques du barrage sont données ci-après :**

- Longueur en crête... .....464 m.

- Hauteur au –dessus du thalweg.....54 m.
- Largeur du couronnement .....5 m.
- Fruit du talus amont variable de .....0,08/1 à 1/1
- Fruit du talus aval.....1,25/1
- Largeur du massif à la base .....137 m.
- Cube d'enrochements .....765.000 m<sup>3</sup>
- de la cuvette .....72.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>

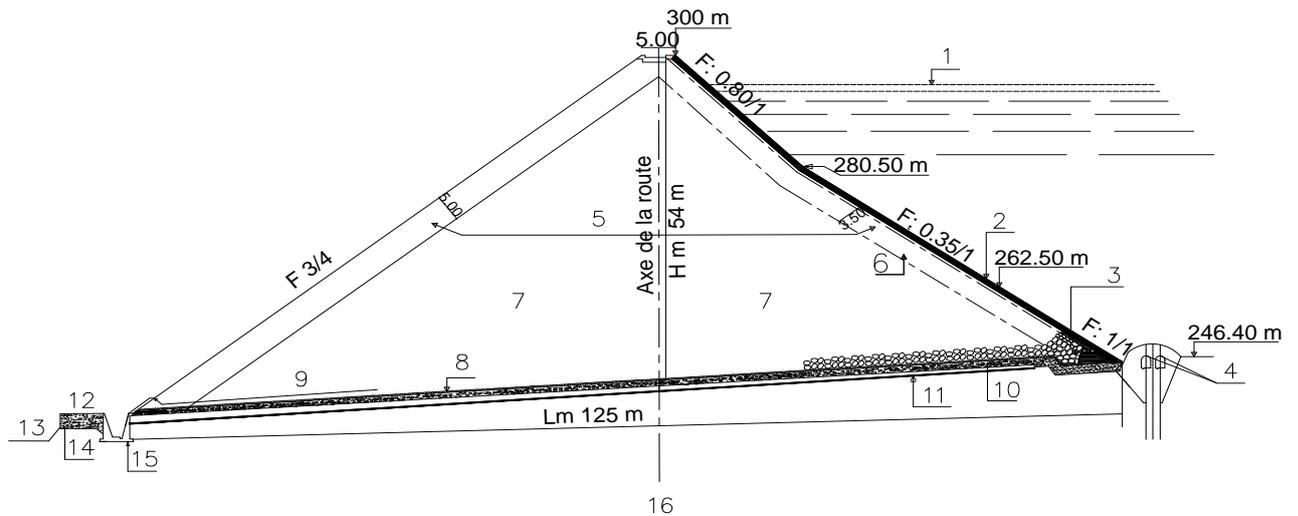


Figure 4.5 : Coupe du barrage Bouhanifia

**Legends**

- 1- Retenue normale :295.00 mMasque étanche.
- 2- Masque étanche.
- 3- Maçonnerie hourdée au béton de gravillon perméable.
- 4- Galeries de drainage et de travail.
- 5- Enrochements soigneusement rangés.
- 6- Assis légèrement relevée diminuer le redan.
- 7- Enrochement de gros blocs arrimés
- 8- Couche maçonnée.
- 9- Risberme à la cote 246.00m.
- 10- Filtre.
- 11- Drain bonna.
- 12/13- Dallage.
- 14- Murette.
- 15- Chambre de colature des eaux de drainage.
- 16- Couche d'Oliocène.

▪ **Structure du masque étanche**

La nature éminemment compressible des terrains de fondation devant faire craindre des tassements relativement importants, générateurs de déformations du parement amont, c'est la formule du masque souple en béton à liant plastique qui a été retenue. Cette formule avait d'ailleurs donné d'excellents résultats au barrage du Ghrib où la construction du masque venait d'être menée à bien dans des conditions particulièrement difficiles, en raison des fortes inclinaisons du talus amont.

Le parement amont est constitué sur 3.50 m d'épaisseur par des blocs choisis et rangés de façon à former des gradins, ceux-ci sont recouverts d'une maçonnerie de 0.40 m d'épaisseur qui régularise la surface du parement :

- a) les têtes des moellons sont complètement enrobées dans un béton de ciment poreux drainant qui présente une surface plane sur laquelle repose le masque étanche, cette couche aux buts suivants:
- Régulariser la surface du parement amont faite d'une maçonnerie de gros éléments ;
  - Assurer le drainage derrière l'écran d'étanchéité, afin d'éliminer le risque de sous-pression en cas de vidange rapide de la retenue, tout en permet de jauger les fuites qui pourraient se produire par perméabilité ou fissuration du masque.
  - La couche de béton poreux est divisée en panneaux séparés par des joints horizontaux garnis d'un mélange de bitume et de liège qui a des propriétés à la fois élastiques et plastiques est peint au moyen d'une dissolution de bitume dans de l'essence, pour favoriser l'adhérence du béton bitumineux, Leur épaisseur et varie pratiquement de 0,12 m à 0,20 m suivant les irrégularités de la maçonnerie.
- b) Une première couche étanche de 0,06m d'épaisseur, en béton bitumineux. Cette couche est armée d'un grillage métallique simple torsion qui est accrochée à un chevron en béton armé encastré dans les tranches supérieures du massif. Ce grillage était mis en tension avant répandage du béton bitumineux.
- c) une deuxième couche étanche de 0,06m d'épaisseur, en béton bitumineux identique à la première, mais ne comportant pas d'armatures. La liaison des deux couches bitumineuses est assurée par un enduit de bitume fluxé à l'essence.

**C'est pour permettre un meilleur compactage du béton bitumineux que le masque a été réalisé en deux couches distinctes liées l'une à l'autre de façon aussi intime que possible**

- d) Une couche de protection (avant masque de protection) contre les efforts mécaniques et les effets thermiques sont constitués de trente-sept panneaux indépendants séparés par des joints nus suivants les lignes de plus grandes pentes. La largeur des panneaux est de 11 m dans le profil courant l'avant masque est formée en béton de 0,12 m d'épaisseur, armé de deux nappes de fils parallèles continus, de diamètre 8 mm, espacés de 15 cm, dressés et soudés sur place, descendant de haut en bas du parement. Des fils horizontaux de diamètre 5 mm, espacés de 15 cm, forment un quadrillage avec chacune des nappes. [28-108]

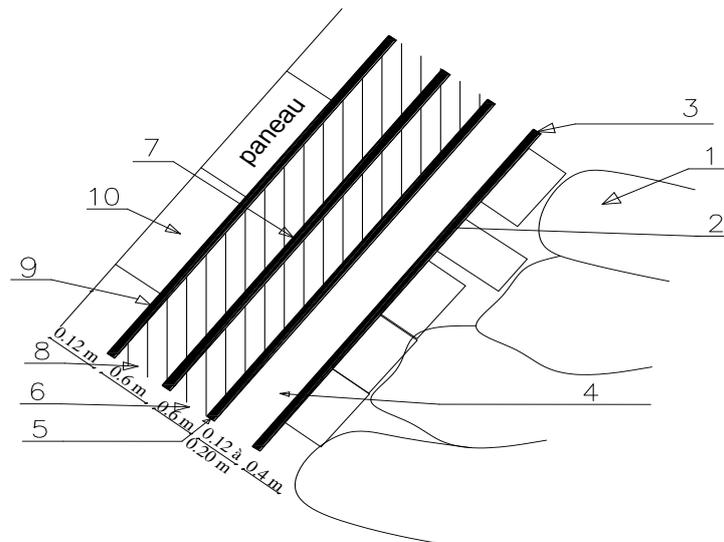


Figure 4.6 : Coupe du masque étanche

### Legends

- 1- Enrochement.
- 2- Ferrailage.
- 3- Enduit en mortier.
- 4- Béton poreux de la couche drainante.
- 5- Peinture en bitume dissolu à l'essence.
- 6- 1<sup>ère</sup> couche étanche en béton bitumineux.
- 7- Enduit en bitume fluxé à l'essence.
- 8- 2<sup>ème</sup> couche étanche en béton bitumineux. Papier interposé pour éviter le contact entre l'avant masque et la couche étanche.
- 9- Panneaux de l'avant masque de protection en béton armé.

## 4.3 Comportement des masques étanche des barrages algériens

### 4.3.1 Barrage Ghrib

Ce masque a rempli convenablement son rôle d'étanchéité souple pendant vingt-cinq années, malgré la disparition en 1953 de sa protection thermique en béton poreux. Des fissurations suivies de soulèvement localisés sont apparues à partir de 1963 dans la partie haute submergée une partie de l'année seulement, mais qu'une peinture réfléchissante protégeait de l'insolation depuis 1954, sans toutefois que cette peinture ait

été entretenue de 1954 à 1963. Ces désordres ont été réparés assez facilement à l'aide de béton et de chapes bitumineuses, mais leur répétition oblige maintenant à considérer la réfection complète du masque.

#### **4.3.2 Barrage Sarno**

Depuis près de vingt ans, le masque donne entière satisfaction puisqu'à retenue pleine les fuites sont négligeables. La peinture réfléchissante qui constitue la protection thermique du masque doit être refaite.

#### **4.3.3 Barrage Bouhanifia**

Dès les premières mises en eau de la retenue, la majorité des panneaux les plus longs de l'avant masque était fissurés horizontalement. Après vingt ans d'exploitation en 1964, ces panneaux présentaient au moins une fissure horizontale ouverte sur toute l'épaisseur de la dalle certaine des panneaux étaient coupés horizontalement, la partie inférieure ayant glissé de 10 cm en moyenne et jusqu'à 25 cm. Au niveau des ruptures, la plupart des armatures de l'avant masque étaient cassées ou fortement corrodées.

Après 6 ans en 1970, le panneau n°14 s'est rompu horizontalement à la cote 283m avec un déplacement de 25cm de la partie inférieure vers le pied du barrage lorsque cette partie du masque ne comportait aucune fissuration apparente. Deux fils de fer de liaison de Ø 5mm est très corrodés, ils sont visibles dans la cassure, et les fers longitudinaux de Ø 8mm, présentaient en grande majorité une importante corrosion.

L'état de corrosion des facettes de rupture montre la répartition inégale des contraintes de traction avait entraîné des cassures successives au cours du temps. [9]

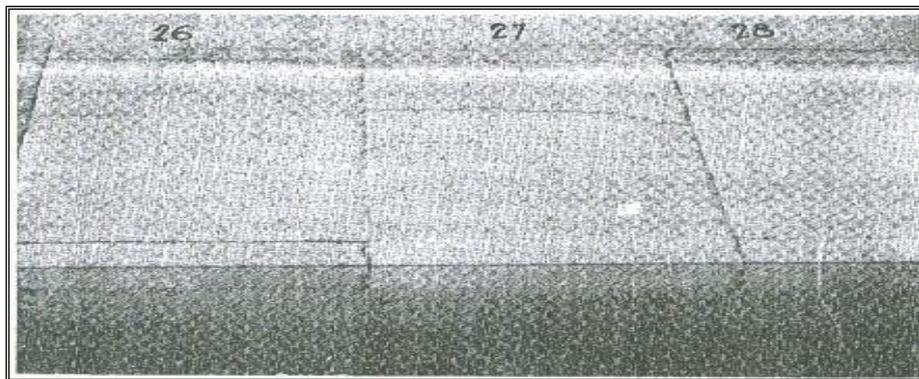


Figure 4.7 : Fissuration des panneaux n°26, 27 et 28 de l'avant masque

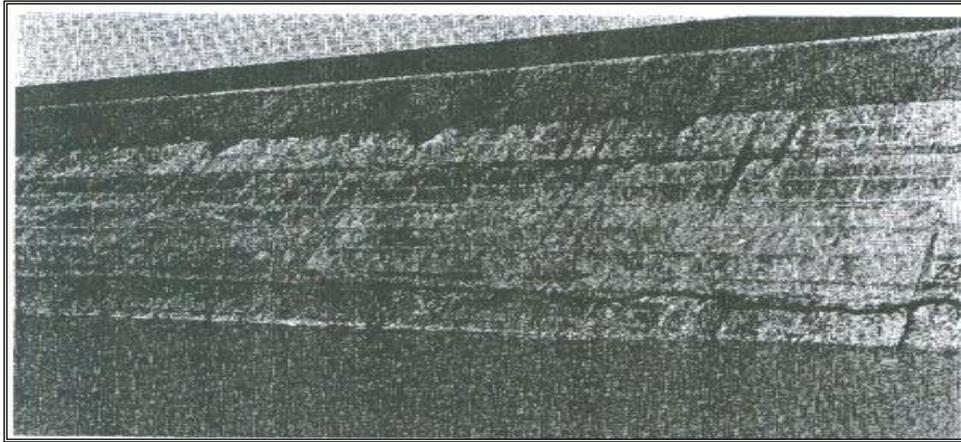


Figure 4.8 : Cassure supérieure du panneau n°29 de l'avant masque au niveau de l'ancrage

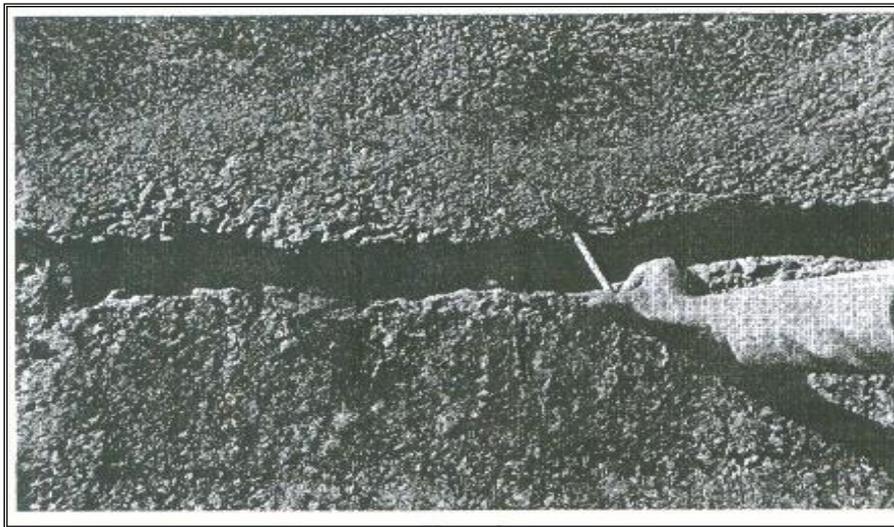


Figure 4.9 : Détail de la cassure du panneau n°29 de l'avant masque au niveau de l'ancrage

En décembre 1970 ont constaté la présence d'eaux entre le béton bitumineux du masque et le béton de l'avant masque, la partie du masque dévoilée par le déplacement de l'avant masque paraissait bonne (surface lisse liant ductile) il en est de même des autres parties observables au niveau des cassures des autres panneaux. [9]

La cassure du panneau n°14 a été bouchée au mortier de ciment et les deux parties, inférieures et supérieures, ont été « épinglées » au moyen d'armature extérieur, de 10 mm de diamètre espacés de 15 cm. On craignait que l'éroulement définitif de la partie inférieure de ce panneau ne vienne déchirer le masque bitumineux.

De plus, la mise en eau, il est remarquable que le débit de fuite du masque n'ait pas évolué et qu'il soit reste faible environ 1l/s à retenue pleine dont une partie provient du masque et le mur de pied.

Une reconnaissance complète effectuée en 1972 et 1973 montres la nécessité de refaire l'avant masque de protection. [9]

#### **4.4 Conclusion**

Les résultats et les observations faites au cours de l'exploitation des quatre barrages Algériens avec masque en béton bitumineux sont :

- Excellente tenue du masque amont, qui a suivi sans perdre ses qualités les déformations du massif, malgré les pentes égales à 1/1 et des températures de 60 à 70°C.
- Prix de revient compétitif : le masque du Ghrib n'a coûté que le 1/100ème du prix de revient de l'ouvrage, celui de l'Ighil Emda les 5/100ème. Ces coûts relatifs sont inférieurs à ceux d'un noyau imperméable ou d'un masque en béton, compte tenu des circonstances locales.
- Le masque en béton bitumineux est certainement la solution la plus facile à réaliser et la plus économique qui puisse être conçue pour l'étanchement parfait des barrages en remblai.
- Le revêtement complet tel qu'il a été exécuté au barrage Bouhnifia ne présente pas plus de la centième partie du coût de l'ouvrage, même si l'on tient compte des dépenses importantes de mise au point de la méthode et des frais élevés de construction d'un matériel spécial.

D'après les données et les analyses suscitées ont conclu que le problème essentiel du masque étanche des barrages suscités est la dégradation de l'avant masque de protection due aux pressions de l'eau et des fuites qui nécessite des rénovations périodiques qui influence négativement sur le coût du projet, aussi cette dégradation engendre l'apparition du masque étanche qui risque aussi de déformer et couler sous l'effet de température élevée.

C'est pour cette raison, nous allons vérifier le comportement du masque étanche sous l'effet des températures très élevées sans la couche de l'avant masque, Nous avons pris le barrage de Bouhnifia comme point de recherche

## **Chapitre 5**

**Etude de comportement du masque du barrage Bouhnifia (Algérie) en absence de la protection thermique.**

## **5.1 Introduction**

Dans le présent chapitre, nous allons étudier le comportement mécanique et physique du masque amont du barrage Bouhnifia sous une température de (+70 °C) en négligeant la protection thermique.

L'étude de la composition d'un masque en béton bitumineux consiste à choisir : des agrégats à gros éléments, éléments fins, filler, dans une proportion choisie, ainsi qu'une quantité de bitume pour constituer après compactage un matériau stable et imperméable. Le liant hydrocarboné (le bitume) est principalement responsable de la cohésion tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l'ensemble.

Pour ce faire, il faut déterminer une composition granulométrique correcte des matériaux, de façon à réduire au minimum le pourcentage des vides dans le mélange compacté à sec ; les vides doivent être remplis de bitume pour réaliser dans les limites imposées par des considérations pratiques, un poids spécifique aussi élevé que possible.

Pour la détermination la composition granulométrique ; Le poids spécifique vrai ; le poids spécifique apparent ; le pourcentage des vides des divers matériaux compactés à sec Séparément et ensemble, et les différentes caractéristiques de l'échantillon confectionné en laboratoire, nous adopterons les méthodes mentionnées ci-après.

Il convient de procéder de même en laboratoire, conformément à ces méthodes par des essais préliminaires du mélange qui sera finalement adopté, pour déterminer sa perméabilité et sa résistance au fluage sur le talus.

## **5.2. Généralités sur les matériaux utilisés**

### **5.2.1 Les granulats**

Le squelette granulaire d'un mélange bitumineux est composé de plusieurs fractions. Ou classes granulaires. La composition granulométrique est obtenue à partir de différents constituants qui sont, en général :

- **Gros agrégats**

Nous désignons par gros agrégats tous les agrégats retenus au tamis n° 10. Ces agrégats sont constitués par des gravillons roulés, des pierres ou un laitier concassé, non susceptible de se briser lors du compactage. Ces agrégats ne doivent pas être atterrés par l'action des intempéries, être non gélifs, propre et exempts de poussières en quantité excessive, de qualité homogène et ne doivent pas comporter plus de 5 % d'élément plats, Ils doivent posséder une bonne affinité pour le bitume. **[5-102]**

- **Agrégats Fins**

Nous désignons par agrégats fins tous les agrégats passant au tamis n°10 et retenus au tamis n° 200. Ces agrégats sont constitués par des sables naturels ou de concassage ou pat mélange de ces deux matériaux. Ces agrégats à, éléments fins doivent être propre et ne pas contenir plus de 3 % d'argile, de limon, ou autres corps étrangers. **[5-102]**

▪ **Filler**

Nous désignons par filler tous matériaux passant au tamis n°200 et constitués par des grains fins calcaires secs, par du ciment, ou par tous autres matériaux fins et inertes ; les filler doivent être exempts de grumeaux. Nous pouvons admettre les fillers d'apport des fines qui passent en totalité au tamis n°80 dont 65 % au moins passent au tamis n° 200. [5-102]

### **5.2.2 Le bitume**

Le bitume confère à l'enrober sa flexibilité et sa capacité à résister à certaines dégradations causées par plusieurs facteurs dont le trafic, les conditions climatiques du site, etc. Parmi les propriétés rhéologiques demandées au bitume, il doit d'abord être maniable à température élevée (vers 160 °C). Ensuite, il doit être suffisamment rigide aux températures élevées de service pour maintenir le squelette granulaire et limiter le fluage des enrobés, enfin, il doit être suffisamment mou aux basses températures pour permettre aux contraintes de se relaxer et résister ainsi à la fissuration par fatigue ou de retrait thermique. [53]

Ces propriétés sont généralement difficilement conciliables, il est donc difficile d'obtenir un bitume utilisable sous tous les climats et trafics possibles. C'est pourquoi différents types de bitumes sont disponibles et divers critères rhéologiques permettent de les caractériser et de les classer.

Les essais pour mesurer ses propriétés peuvent être de deux types [5-36-73]

#### **5.2.2.1 Les essais technologiques**

Le bitume est caractérisé conventionnellement par un panel d'essais dits « technologiques » tels que la pénétration, la température de ramollissement Bille et Anneau, et le point de fragilité, ils tendent à caractériser la consistance du produit dans des conditions normalisées. Ils définissent les spécifications sur lesquelles sont fondés les choix des bitumes pour les diverses applications.

- **La température de fragilité** (NF EN 12593) [88] : c'est la température à laquelle un film mince de bitume rompt sous l'effet de flexion dans des conditions opératoires bien définies de fabrication et d'essai. La température FRASS est utilisée pour caractériser, dans des conditions particulières, le comportement du bitume à basse température.
- **La mesure de pénétrabilité** (NF EN 1426) [89]. La pénétrabilité représente la mesure de l'enfoncement d'une aiguille normalisée dans un bitume maintenu à une température donnée, au bout de 5 secondes sous une charge définie. Elle s'exprime en 1/10 mm. La pénétrabilité la plus utilisée est celle mesurée à 25 °C et avec un chargement de 100g. Ainsi, à une température donnée, plus un bitume est dur, plus sa valeur de pénétrabilité est faible. (Figure 5.1). [5-36]

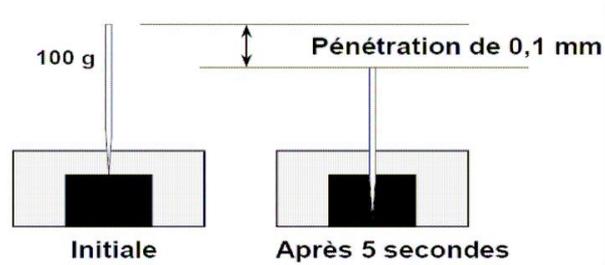


Figure 5.1 : Mesure de pénétrabilité

- **Le point de ramollissement Bille et Anneau (TBA) (NF EN 1427) [91]:** c'est la température pour laquelle une bille d'acier s'enfonce à travers un disque de bitume contenu dans un anneau de métal dans des conditions définies de fabrication et d'essai.



Figure 5.2 : Appareil de l'essai « Bille et anneau »

Ces deux derniers essais permettent de définir à quelle classe de pénétrabilité (ou grade) le bitume appartient. [5-36]

Tableau 5.1 : classe de pénétrabilité de bitume

	Unité	Classes								
		20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
<b>Pénétrabilité à 25 C°</b>	0.1 mm	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
<b>Température de Bille et anneau</b>	C°	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38

### **5.2.2.2 Les essais rhéologiques**

Ils permettent de mesurer une grandeur physique définie (module, complaisance, viscosité). La rhéologie est l'étude physique des déformations de la matière liées à la viscosité, la plasticité, l'élasticité et l'écoulement sous l'effet des contraintes. La mesure de ces grandeurs physiques a pour but de prévoir le comportement mécanique des matériaux, et en l'occurrence, du bitume.

### **5.2.3 Liaison bitume - granulat**

Dans un enrobé bitumineux, le bitume est utilisé pour enduire les granulats dans l'intention de les agglomérer et d'assurer une étanchéité et/ou une adhésion de l'ensemble. L'accrochage du liant aux granulats doit donc être aussi intense que possible. L'adhésion du bitume à un granulat n'est d'autant plus importante que le bitume la mouille parfaitement. [53]

L'adhésivité est une propriété d'attraction entre deux matériaux, la collectivité, par contre, est relative à la cohésion interne d'un matériau, dans le cas du bitume, elle est essentiellement liée à la viscosité. Quant à l'effet mouillant, il est le signe visible de l'existence de forces attractives d'un liquide pour un autre composé. Il matérialise l'adhésivité entre deux matériaux, par exemple, un liquide et un solide.

### **5.2.4 Structure des enrobés bitumineux**

Les qualités d'adhésion et d'étanchéité au sein de l'enrobé bitumineux résultent du concours des propriétés de l'interface de chaque granulat avec le bitume, mais aussi des caractéristiques de la structure de l'enrobé pris dans son ensemble. Ainsi, le bitume est généralement bien fixé et retenu par les granulats dans des enrobés denses où il a été mélangé aux granulats secs à température élevée.

L'enrobé doit donc idéalement consister en une structure homogène et compacte, dans laquelle les granulats sont fixés dans un continuum de bitume. En pratique, il existe toujours des hétérogénéités dues à la ségrégation, la sédimentation et le gonflement des granulats.

La plupart des bitumes se comportent comme des liquides visqueux à des températures ordinaires (de l'ordre de 30 °C). S'il existe des différences de densité entre le bitume et les granulats ou si la viscosité du bitume est très faible, les granulats ont théoriquement tendance à sédimenter (ou flotter) au bout d'un certain temps. Ces phénomènes conduisent à une accumulation des granulats dans les couches inférieures (ou supérieures) de l'enrobé. Une telle accumulation entraîne la diminution de l'épaisseur du film de bitume entourant chaque granulat, elle induit donc une plus grande perméabilité de l'enrobé et favorise l'absorption d'eau.

En ce qui concerne le gonflement de l'enrobé, il est lié au rapport bitume/granulats et surtout à la nature de ces derniers. Les granulats qui présentent des affinités pour l'eau ont tendance à absorber l'humidité ambiante et plus rarement certains granulats produisent des gaz à la température de fabrication ou d'utilisation des enrobés. Ces deux phénomènes, absorption d'eau ou production de gaz, conduisent à des gonflements de la structure de l'enrobé. Des pores et des fissures peuvent se développer, endommager la structure de l'enrobé et réduire l'adhésion de l'ensemble et l'étanchéité.

### **5.3 Étude expérimentale**

#### **5.3.1 Méthodologie générale**

L'étude de formulation de béton bitumineux consiste en une série de compromis, puisque le comportement de l'enrober oscille entre sensibilités aux déformations permanentes, et à la fissuration par fatigue ou à désenrobage par arrachement des granulats. [87]

La formulation des matériaux hydrocarbonés décomposée en trois phases principales:

- 1) La sélection et l'identification des constituants (granulats et bitume);
- 2) La formulation et la mise au point du mélange;
- 3) L'épreuve de formulation pour la validation des mélanges bitumineux.

Il y a plusieurs méthodes Pour la formulation d'un mélange bitumineux, pour notre étude, on utilise la méthode de Marshall.

#### **5.3.2 Méthode Marshall (NQ 2300-060)**

Cette méthode est donnée par l'ingénieur Bros Marshall et après des recherches et des études dans ce domaine, elle a été développée par l'association américaine des essais et des matériaux (ASTM D-1545).

La méthode Marshall est la plus connue et la plus utilisée en Amérique. Elle est normalisée par le BNQ et recommandée au Québec pour l'analyse et le contrôle des enrobés bitumineux classiques. Elle permet de mesurer en laboratoire la résistance d'une éprouvette à la déformation (stabilité) sous l'application graduelle d'une charge, et la déformation subie par cette même éprouvette au moment de sa rupture sous l'application de la charge maximale. (Figure 5.3)



Figure 5.3 : Appareil de Marshall

Comme dans les autres méthodes d'analyse, l'éprouvette exige une préparation particulière. Elle consiste en une briquette circulaire de 105 mm de diamètre et de 62.5 mm de haute préparée par le compactage mécanique de l'enrobé.

### **5.3.2.1 Principes de la méthode Marshall**

Avant de soumettre les éprouvettes à l'essai, il faut d'abord procéder à leur confection conformément à la méthode LC 26-020. Les caractéristiques du bitume et granulats qui doivent être connues sont :

- ✓ Densité brute des granulats ;
- ✓ Densité du bitume utilisé ;
- ✓ Teneur en bitume.

L'essai Marshall permet de mesurer:

- ✓ La densité brute du mélange;
- ✓ La stabilité de l'éprouvette;
- ✓ La déformation de l'éprouvette;
- ✓ La densité maximale du mélange.

### **Procédure sommaire**

Régler le cadran de la presse Marshall à zéro et vérifier les tiges de guidage. Placer l'éprouvette, essuyée en surface, entre les mâchoires. Placer les au moment où la charge maximale est atteinte et noter cette charge (l'essai doit être réalisé dans les 3 secondes qui suivent la mise en marche de la presse). Finalement lire en millimètres les déformations obtenues.

**La stabilité** Marshall est la valeur de la charge maximale obtenue par un essai de compression exercée suivant une génératrice d'une éprouvette semi-traitée et préalablement **Le fluage** Marshall est l'affaissement de cette même éprouvette au moment de la rupture par compression.

### **5.3.2.2 Le meilleur enrobé suivant la méthode de Marshall**

Le meilleur enrobé est évidemment celui qui donne le revêtement répandant le mieux à toutes les exigences. Celles-ci tiennent en grande partie, de près ou de loin, à la teneur en bitume, à la granulométrie du mélange de granulats et à la compacité de l'enrobé après la mise en œuvre.

### **5.3.3 Préparation du mélange et confection des éprouvettes**

On considère que chaque mélange expérimental est un guide qui nous permet de contrôler le type de mélange expérimenté ensuite, de préférence au début de préparation du mélange, on utilise des agrégats d'une gradation granulométrique près du milieu des limites des caractéristiques, L'obtention d'une gradation granulométrique appropriée nécessite un mélange entre plusieurs types de granulats à différents pourcentages qui nous donne un mélange plus économique.

### 5.3.3.1 Détermination des caractéristiques des agrégats

#### a) L'équivalente de sable (NF P 18-598)

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propriété des sables entrant dans la composition des bétons, l'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux, plus grossiers. [90]

Pour la détermination d'équivalente de sable on fait un simple essai consiste a :

1. prendre une masse de sable ( $M_s$ ).
2. prendre des verres gradués et on remplir par un volume d'eau.



Figure 5.4: Verres gradués remplis d'eau

3. Mettre la quantité des matériaux secs dans les verres gradués et laissés pendant 24 h et on lire ensuite :

$h_1$  : Sable propre + élément fins.

$h_2$  : Sable propre.

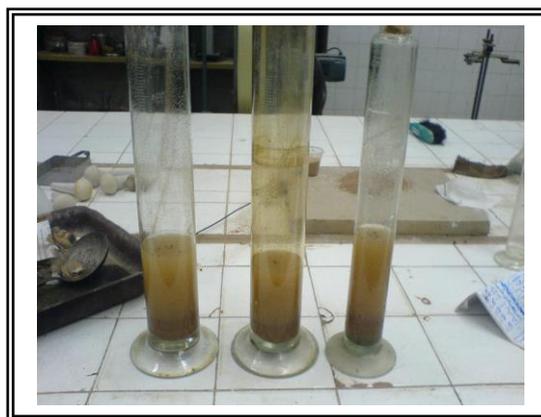


Figure 5.5: Remplissage des verres par l'échantillon du sable

4. on calcule l'équivalente de sable 
$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (5.1)$$

Tableau 5.2 : Equivalente du sable

Nombre d'échantillons		U	1	2	3
Volume 1	<b>h<sub>1</sub></b>	m <sup>3</sup>	300	270	200
Volume 2	<b>h<sub>2</sub></b>	m <sup>3</sup>	250	200	150
<b>Equivalente du sable</b>	<b>ES</b>	%	<b>83.00</b>	<b>74.00</b>	<b>75.00</b>
<b>Valeur moyenne</b>			<b>ES = 77.33 %</b>		

**b) Poids spécifique du granulat (*G<sub>se</sub>*)**

Poids spécifique du granulat est le poids par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

Le Poids spécifique du granulat exprimé en (t/m<sup>3</sup>), (kg/dm<sup>3</sup>) ou en (g/cm<sup>3</sup>) généralement égale a (2.65 t/m<sup>3</sup> ou 2.65 g/cm<sup>3</sup>). [90]

Pour la détermination du poids spécifique du granulat on fait un simple essai consiste a :

1. Prendre une masse de mélange gravier et sable (**M**).
2. Prendre un verre gradué et on remplir par un volume d'eau **V<sub>1</sub>**.
3. Mettre la quantité des matériaux secs dans le verre et on lire le nouveau volume **V<sub>2</sub>**.

4. On calcule la masse volumique 
$$G_{se} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (5.2)$$

Les résultats sont présentés au tableau suivant :

Tableau 5.3 : Poids spécifique vrai

Nombre d'échantillons		U	1	2	3
Masse	<b>M</b>	g	300	300	300
Volume 1	<b>V<sub>1</sub></b>	cm <sup>3</sup>	200	300	400
Volume 2	<b>V<sub>2</sub></b>	cm <sup>3</sup>	310	419	510
<b>Poids spécifique</b>	<b>G<sub>se</sub></b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>	<b>2.72</b>	<b>2.53</b>	<b>2.72</b>
<b>Poids spécifique moyen</b>			<b>2.65 g/cm<sup>3</sup></b>		

**c) L'analyse granulométriques**

▪ **But de l'essai**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 60 mm, à l'exclusion des fillers. [90-113]

L'analyse granulométrique est l'essai le plus largement utilisé, on l'emploie pour l'étude des sols des bétons hydraulique, des enrobés, des produits chimiques, des charbons, etc.....

▪ **Principe de l'essai**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis. Emboîtés, les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis. [90-113]

On appelle Tamisât : le poids de matériau passant à travers un tamis  
On appelle Refus : le poids de matériau retenu par ce même tamis.

▪ **Échantillonnage**

L'échantillon doit représenter le plus fidèlement possible la composition moyenne du matériau à essayer.

Le poids de l'échantillon à analysé dépend des dimensions et du pourcentage des éléments les plus gros qu'il contient.

Remarque : la composition granulométrique reportée dans le diagramme doit correspondre aussi étroitement que possible à la courbe granulométrique moyenne spécifiée pour le matériau voir. (Figure 5.6) [5-102]

On appelle :

- Courbe « nougat », une courbe riche en sable donc pauvre en gravillons ;
- Courbe « grenue », une courbe riche en gravillons donc pauvre en sable (on parle également de courbe « creuse ») ;
- Courbe « semi-grenue », une courbe intermédiaire entre la courbe nougat et la courbe grenue.

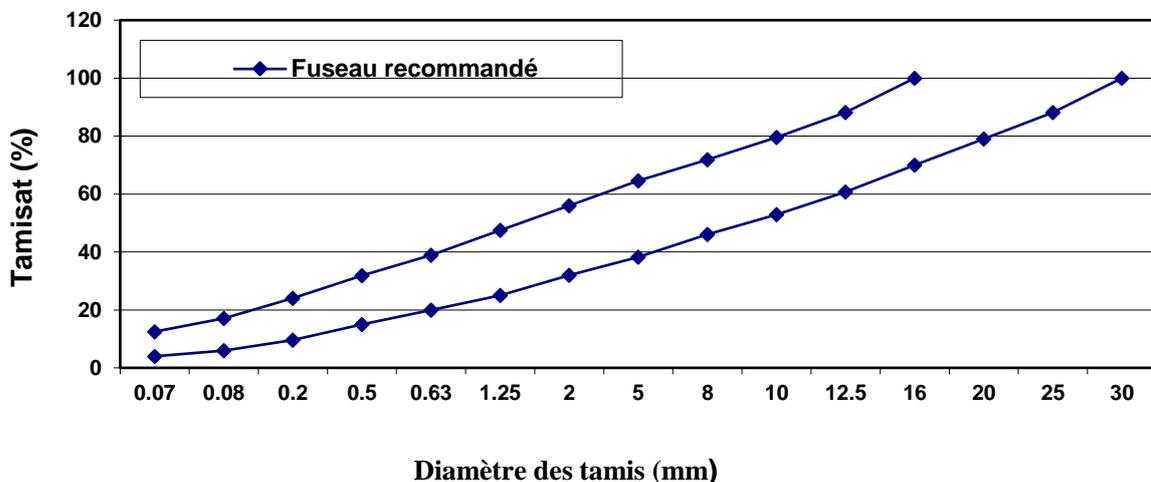


Figure 5.6: Fuseau granulométrique recommandé

▪ **Exécution de l'essai**

- ✓ Le matériau préalablement échantillonné, est séché dans une étuve à 105 C° pendant 24 h.
- ✓ L'échantillon à analyser est versé sur le tamis supérieur de la colonne fixée sur le tamiseuse électrique, le dernier tamis est surmontant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins, un couvercle est également disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.
- ✓ On fait vibrer par la tamiseuse électrique pendant 15 à 20 min, après on reprendre une à une les différents tamis et on fait peser les différents refus.
- ✓ On porte les divers pourcentages des tamisats sur la feuille de travail, la courbe est tracé de manière continue et ne passe pas rigoureusement par tous les points.



Figure 5.7 : Tamisage électrique

Les résultats de l'analyse granulométriques sont présentés au tableau suivant :

Tableau 5.4 : Analyse granulométrique de l'échantillon

<b>Diamètre (mm)</b>	<b>Retenus partiels (g)</b>	<b>Retenus partiels (%)</b>	<b>Retenus cumulés (%)</b>	<b>Tamisat (%)</b>
25.0	0	0	0	100
20.0	60	6	6	94
16.0	67	6.7	12.7	87.3
12.5	97	9.7	22.4	77.6
10.0	96	9.6	32	68
8.0	76	7.6	39.6	60.4
5.0	76	7.6	47.2	52.8
2.0	88	8.8	56	44
1.25	66	6.6	62.6	37.4
0.63	86	8.6	71.2	28.8
0.5	58	5.8	77	23
0.2	55	5.5	58.5	17.5
0.08	66	6.6	89.1	10.9
< 0.08	29	2.9	92	8

▪ **Traçage de la courbe**

On porte les divers pourcentages des tamisats sur la feuille de travail, la courbe est tracé de manière continue et ne passe pas rigoureusement par tous les points.

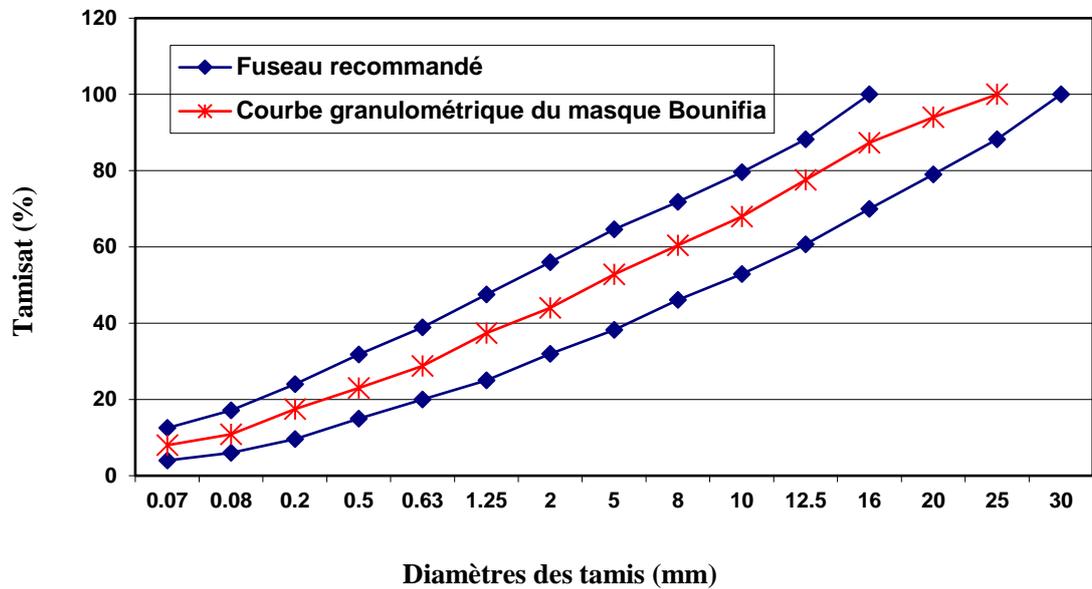


Figure 5.8 : Courbe granulométrique de l'échantillon

**5.3.3.2 Détermination des caractéristiques bitume**

Les caractéristiques bitume sont données au tableau suivant :

Tableau 5.5: Caractéristiques physiques du bitume

Nombre d'échantillon	Indice de pénétration	Point de ramollissement
03	54	51°

**5.3.3.3 Confection des éprouvettes**

- 1- Dans un récipient métallique placé sur le plateau d'une balance, nous pesons successivement les quantités fixées de différents agrégats, en commençant par les plus gros et à l'exclusion du filler ajouté. Ces quantités prévues de liant, nous chauffons celui-ci à une température entre 140°C et 160°C pendant 30 à 45 minutes de manière à lui conférer la fluidité excessive à l'enrobage sans qu'il atteigne la température où la vaporisation des huiles deviendrait excessive (le bitume ne doit pas émettre de vapeur).

- 2- Aussitôt retirés de l'étuve, les agrégats sont versés dans le récipient du liant. Nous ajoutons ensuite le filler, qui n'a pas besoin d'être chauffé, mais qui doit être sec.
- 3- Nous mélangeons la totalité pendant 30 minutes, le mélange pourra d'être effectué soit :
  - a. A la cuillère (pour faciliter le malaxage et éviter le refroidissement, nous portons le récipient sur une plaque chauffante).
  - b. Dans un malaxeur convenable, le malaxeur devra être tel que la ségrégation des matériaux soit réduite au minimum. Figure 5.9



Figure 5.9 : Malaxage du mélange

- 4- Nous remplissons les moules nécessaires (cylindriques creux posés sur la plaque de base), l'intérieur du cylindre creux et la plaque de base sont enduit d'une légère couche d'oléate de soude glycérique, en tassant chaque fois avec la cuillère ; nous versons ainsi la totalité de la gâcher. Nous ajustons le cylindre plein et nous portons le tout entre les plateaux de presse pour le compactage.



Figure 5.10 Préparation et remplissage des moules

5- Le compactage est fait de la manière suivante :

- Nous appliquons progressivement la pression jusqu'à atteindre au bout d'une minute  $120 \text{ kg/cm}^2$  sur la base de l'éprouvette cylindrique.
- Les éprouvettes peuvent être comprimées entre deux pistons, nous maintenons cette pression 5 minutes puis nous relâchons ensuite lentement.
- Les éprouvettes peuvent être aussi comprimées par coups entre (30-50) coups pour chaque face de l'éprouvette.
- Pour notre cas, on applique le 3<sup>eme</sup> cas. ; un disque de papier filtre est placé sur la surface de l'enrobé avant compactage. La durée de compactage (damage et manutention) ne doit pas excéder 3 minutes, afin d'éviter tout risque de refroidissement.



Figure 5.11 : Compactage des éprouvettes

6- Nous laissons refroidir le temps suffisant (24h) pour que le démoulage puisse se faire sans déformation de l'éprouvette. Le démoulage se fait à l'aide de la presse en chassant l'éprouvette dans le cylindre creux de diamètre un peu plus grand.



Figure 5.12 : Refroidissement des éprouvettes

1- Nous mesurons au pied à coulisse, au  $1/10 \text{ mm}$  près les diamètres et les hauteurs de ces éprouvettes et nous les pesons à  $0.5 \text{ g}$  près. Nous déduisons de ces mesures une valeur de la densité apparente des éprouvettes ne tenant pas compte de l'effet de paroi.



Figure 5.13 : Mesure des éprouvettes

#### 5.3.3.4 Détermination des propriétés des mélanges bitumineux « éprouvette »

Du point de vue pratique, les composés bitumineux sont des matériaux compliqués car leurs propriétés dépendent des conditions de contraintes et de température. Ils consistent en deux composants de caractéristiques complètement différentes : l'agrégat minéral qui est surtout élastique en toutes circonstances ; et le bitume, qui se comporte comme un liquide visqueux à haute température et sous les charges de longue durée, et comme un matériau élastique à faible température et sous les charges de courte durée. Par conséquent, les structures bitumineuses présentent des propriétés à la fois plastiques et élastiques. Il n'est pas possible de déterminer la limite entre ces deux conditions, mais ceci n'est pas important, car pour les applications hydrauliques, ce sont surtout les cas extrêmes qui importent. [48-113]

En vue de l'étude préalable de recherche de la meilleure composition à adopter pour la confection d'une gâchée avec des caractéristiques recommandées, [110] On fait des essais sur :

- ✓ La densité apparente.
- ✓ Le pourcentage des vides occupé par l'air.
- ✓ Le pourcentage des vides des agrégats.
- ✓ Le pourcentage des vides occupé par le bitume.
- ✓ La stabilité suivant Marshall.
- ✓ Le fluage.

#### ▪ La densité vraie. [52]

$$D_m = \frac{100}{\frac{P_b}{D_b} + \frac{P_{a1}}{D_{a1}} + \frac{P_{a2}}{D_{a2}} + \dots + \frac{P_{ai}}{D_{ai}}} \quad (5.3)$$

**D<sub>m</sub>** : La densité vraie de l'éprouvette.

**P<sub>b</sub>** : Le pourcentage en poids du bitume.

**D<sub>b</sub>** : La densité du bitume.

**P<sub>a1,a2,a3.....</sub>** : Le pourcentage en poids des agrégats.

$D_{a1,a2,a3,\dots}$  : La densité de l'agrégats 1, 2,3, etc.....

- **Le Pourcentage volumétrique des vides résiduels (ou vide de l'éprouvette).** [52]

$$Vm = 100 \frac{(Dm - dm)}{Dm} \quad (5.4)$$

$dm/Dm$  : est le volume vrai de l'agrégat dans l'éprouvette

- **Le pourcentage volumétrique des pleins (ou compacité).** [52]

Le pourcentage de vide ou compacité est une importante caractéristique pour un enrobé. Il représente le volume d'air libre compris dans le mélange. C'est le premier paramètre doit être vérifié dans une formulation. La compacité a une influence sur d'autres facteurs comme la texture et la durabilité, c'est le premier paramètre doit être vérifié dans une formulation. Ces vides sont influencés par :

- ✓ La distribution granulométrique ;
- ✓ La texture des granulats ;
- ✓ La forme des granulats ;
- ✓ La teneur en bitume.

Le schéma ci-dessous permet de mieux visualiser comment sont répartis les volumes dans un enrobé et ce que représente le volume d'air libre:

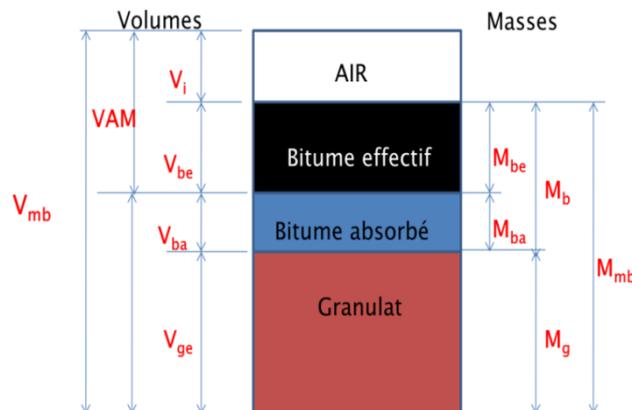


Figure 5.14 : Répartition des volumes dans une éprouvette de l'enrobé

Où

- Mmb : Masse totale du mélange.
- Mg : Masse des granulats dans le mélange.
- Mb : Masse totale de bitume dans le mélange.
- Mbe : Masse de bitume effectif.
- Mba : Masse de bitume absorbé.
- Vmb : Volume brute du mélange compacté.

Vgb : Volume apparent des granulats (pores compris)

Vge : Volume effectif des granulats (volume solide).

Vba : Volume de bitume absorbé.

Vbe : Volume de bitume effectif.

VAM : Volume occupé par l'espace entre les granulats dans un enrobé compacté, en incluant les vides interstitiels dans l'enrobé (Vi) et le volume de bitume effectif (Vbe), exprimé en pourcentage par rapport au volume brut de l'enrobé compacté (Vmb).

Vi : Volume total occupé par l'air emprisonné entre les granulats enrobés dans un enrobé compacté exprimé en pourcentage du volume brut de l'enrobé Compacté (Vmb).

Le pourcentage de vide se calcule à partir de la formule suivante:

$$C = 100 - Vm \quad (5.5)$$

▪ La densité apparente de l'agrégat dans l'éprouvette (ou densité sèche)  $d_A$ . [52]

$$d_A = d_m \frac{(1 - P_b)}{100} \quad (5.6)$$

▪ Poids spécifique de l'agrégat  $D_A$ . [52]

$D_A = \frac{\text{Poids de l'agrégat}}{\text{Volume vrai de l'agrégat}}$

$$D_A = \frac{(100 - P_b)}{\frac{P_{a1}}{D_{a1}} + \frac{P_{a2}}{D_{a2}} + \frac{P_{a3}}{D_{a3}} + \dots + \frac{P_{ai}}{D_{ai}}} \quad (5.7)$$

▪ Le Pourcentage volumétrique des vides occupés par l'air et par le bitume dans l'éprouvette (ou vides de l'agrégat)  $V_A$ . [52]

$$V_A = 100 \frac{(D_A - d_A)}{D_A} \quad (5.8)$$

$d_A/D_A$  : est le volume vrai de l'agrégat dans l'unité de volume de l'éprouvette

▪ Pourcentage des vides comblés par le bitume (Rb). [52]

$$R_b = \frac{V_b}{V_A} = 100 \left( \frac{V_A - V_m}{V_A} \right) \quad (5.9)$$

▪ Le volume des vides occupés par le bitume. [52]

$$V_b = V_A - V_m \quad (5.10)$$

**Chapitre 5 : Etude de comportement du masque du barrage Bouhnifia (Algérie) en absence de la protection thermique.**

Les résultats sont donnés au tableau suivant :

Tableau 5.6 : Caractéristiques des éprouvettes en béton bitumineux

Echantillons		U	1	2	3	Valeurs recommandées
Hauteur	h	cm	6.2	6.3	6.0	/
Poids dans l'air sec	P1	g	1181.9	1195.5	1174.4	/
Poids dans l'eau	P2	g	685.5	689.7	679.6	/
Poids après essorage dans l'air	P3	g	1186.1	1199.8	1178.3	/
Poids d'eau absorbé p3-p1	W	g	4.2	4.30	3.9	/
Volume apparent p1-p2-w	V	cm <sup>3</sup>	492.2	501.5	490.9	/
Densité = P1/V	dm	g/cm <sup>3</sup>	2.4	2.38	2.39	Maximal
Fluage	/	mm	2.80	2.65	2.70	≤ 8.0
Stabilité	/	KN	9.0	8.0	7.0	≥ 6.0
% des vides de l'air	Va	%	1.60	2.00	1.66	(1.5-2.3) %
% des vides des agrégats	Vma	%	21.90	21.55	21.59	> (16-19) %

Enfin cette étude montre que les résultats obtenus sont conformes aux normes recommandées [20-110], mais reste de faire des analyses sur :

- ✓ La Résistance à la compression ;
- ✓ Le Pourcentage d'imbibition ;
- ✓ Le Pourcentage de gonflement ;
- ✓ La Stabilité suivant Marshall après immersion de 14 et 28 jours ;
- ✓ La Perméabilité ;
- ✓ La Stabilité sur talus.

#### 5.3.3.4.1 Résistance à la compression

L'essai de compression a été conduit sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 8 cm et de hauteur de 10 cm. Après confection des éprouvettes, celle-ci est immergée dans des bains à des températures de 0°C, 50°C et 20° °C pendant 02 heures. Les éprouvettes sont retirées des bains et immédiatement placées entre les plateaux de la presse.

$$R = \frac{P}{S} \quad (5.11)$$

Où :

**R** : La résistance à la compression en **kg/cm<sup>2</sup>**

**P** : la charge maximale en **kg**

**S** : la section latérale en **cm<sup>2</sup>**       $S = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.12)$

- 1- La résistance à la compression à une température de 20°C (R20) qui doit être supérieur à la valeur recommandée **R20 = 30 kg/cm<sup>2</sup> [110]**
- 2- La résistance à la compression à une température de 50°C (R50) qui doit être supérieur à la valeur recommandée **R50 = 15 kg/cm<sup>2</sup> [110]**

**Chapitre 5 : Etude de comportement du masque du barrage Bouhnifia (Algérie) en absence de la protection thermique.**

- 3- Le coefficient de la stabilité calorifique ( $K_t$ ) où  $K_t = R_{20}/R_{50}$  doit être supérieur à **2.5** valeur recommandée [110]  
 4- Le coefficient de souplesse ( $K_e$ ) où  $K_e = R_0/R_{20}$  doit être inférieur à **2.8** valeur recommandée [110]



Figure 5.15: Essai de compression

Les résultats obtenus sont donnés au tableau suivant :

Tableau 5.7: La résistance à la compression

Echantillon		U	4	5	6	Valeurs recommandées
Diamètre	<b>D</b>	cm	8.0	8.0	8.0	/
Hauteur	<b>H</b>	cm	10.0	10.0	10.0	/
Poids	<b>P</b>	g	1002.7	997.0	1002.9	/
Section	<b>S</b>	cm <sup>2</sup>	50.24	50.24	50.24	
Charge appliqué	<b>P</b>	kg	6000	4000	1000	
Résistance R0 à 0°C	<b>R0</b>	Kg/cm <sup>2</sup>	<b>119.43</b>	/	/	/
Résistance R20 à 20°C	<b>R20</b>	Kg/cm <sup>2</sup>	/	<b>79.62</b>	/	> 30 kg/cm <sup>2</sup>
Résistance R50 à 50°C	<b>R50</b>	Kg/cm <sup>2</sup>	/	/	<b>19.90</b>	> 15 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficient de souplesse	<b>Ke</b>	/	= R0/R20 = <b>1.50</b>			< 2.8
Coefficient de la stabilité calorifique	<b>Kt</b>	/	= R20/R50 = <b>4.00</b>			> 2.5

**5.3.3.4.2 Pourcentage d'imbibition**

Deux éprouvettes sont conservées sous l'eau à une température de 18°C pendant 14 jours et puis pesées en vue du calcul le pourcentage d'imbibition. Le pourcentage d'imbibition se calcule à partir de la formule suivante:

$$\left( \frac{P_h - P_0}{P_0} \right) \times 100 \quad (5.13)$$

Où :

- $P_0$  : poids de l'éprouvette avant l'immersion ;
- $P_h$  : poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours.

La valeur trouvée doit d'être inférieure à **1.5 %** la valeur recommandée. [5-110]

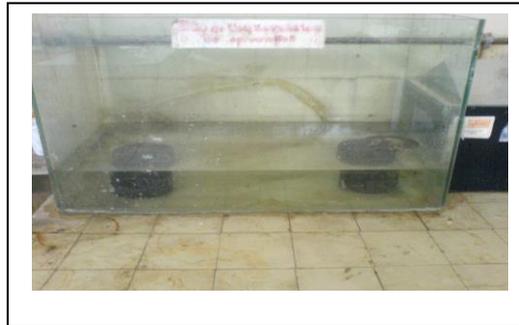


Figure 5.16: Des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 14 jours

Les résultats obtenus sont donnés au tableau suivant :

Tableau 5.8: Pourcentage d'imbibition

Echantillon		U	7	8	Valeurs recommandées
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	$P_0$	g	1175.8	1174.5	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	$P_{h14}$	g	1180.9	1178.6	/
<b>Pourcentage d'imbibition</b>	/	%	<b>0.434</b>	<b>0.349</b>	< 1.5 %

#### 5.3.3.4.3 Pourcentage de gonflement

Les mêmes éprouvettes immergées sous l'eau pendant 14 jours à la même température sont mesurées pour déterminer le gonflement.

Le pourcentage de gonflement ou pourcentage volumétrique est calculé d'après la formule suivante :

$$\left( \frac{V_h - V_0}{V_0} \right) \times 100 \quad (5.14)$$

Où :

- $V_0$  et  $V_h$  sont respectivement les volumes de l'éprouvette avant et après l'immersion pendant 28 jours.

La valeur trouvée doit d'être inférieure à **0.5 %** la valeur recommandée. [5-110]

Les résultats obtenus sont donnés au tableau suivant :

Tableau 5.9: Pourcentage de gonflement

Echantillon		U	8	Valeurs recommandées
Diamètre avant l'immersion	D	cm	10.2	/
Hauteur avant l'immersion	H	cm	6.3	/
Diamètre après 28 jours	D <sub>1</sub>	cm	10.22	/
Hauteur après 28 jours	H <sub>1</sub>	cm	6.3	/
Volume de l'éprouvette avant l'immersion	V <sub>0</sub>	cm <sup>3</sup>	514,53	/
Volume de l'éprouvette après 28 jours	V <sub>h</sub>	cm <sup>3</sup>	516,55	/
Pourcentage de gonflement	/	%	<b>0.392</b>	< 0.5 %

#### 5.3.3.4.4 Stabilité suivant Marshall après immersion pendant 14 et 28 jours

La stabilité des éprouvettes est déterminée après 14 et 28 jours de conservation sous l'eau à la température ambiante. (Figure 5.17)

La valeur trouvée doit d'être supérieure à 5.4 KN la valeur recommandée. [5-110]

- **Stabilité suivant Marshall après immersion pendant 14 et 28 jours**

La stabilité des éprouvettes est déterminée après 14 et 28 jours de conservation sous l'eau à la température ambiante.

La valeur trouvée doit d'être supérieure à 5.4 KN la valeur recommandée. [5-110]



Figure 5.17: Essai de Marshall

**Chapitre 5 : Etude de comportement du masque du barrage Bouhnifia (Algérie) en absence de la protection thermique.**

Les résultats obtenus sont donnés au tableau suivant :

Tableau 5.10: Stabilité suivant Marshall

Echantillon		U	7	8	Valeurs recommandées
Diamètre	D	cm	10.3	10.3	/
Hauteur	H	cm	6.3	6.2	/
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	P <sub>0</sub>	g	1175.8	1174.5	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	P <sub>h14</sub>	g	1180.9	1178.6	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 28 jours	P <sub>h28</sub>	g	/	1178.7	/
Fluage	/	mm	2.85	2.1	≤ 8.0
Stabilité	/	KN	12	7	≥ 6.0

**5.3.3.4.5 Perméabilité**

L'étanchéité étant la qualité fondamentale d'un masque, toutes les éprouvettes ont été essayées sous une pression d'eau de 6 kg. Elles sont toutes demeurées étanches après 24 heures de contact

La valeur de la perméabilité préférée doit être inférieure à la valeur recommandée de **5.10<sup>-10</sup> m/s**. [52]

Le coefficient de perméabilité est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$K = \frac{(q * l)}{(h * f)} \text{ (cm / s)} \quad (5.15)$$

Dans laquelle:

- **q** : Débit de fuite en (cm<sup>3</sup>/s) ;
- **l** : Epaisseur de la plaque en (cm) ;
- **h** : Pression en (cm) d'eau, mesurée depuis la face inférieure de la plaque ;
- **f** : Surface de l'éprouvette en (cm<sup>2</sup>).

Les résultats obtenus sont donnés au tableau suivant :

Tableau 5.11: Perméabilité

Echantillon	Perméabilité (cm/s)
1	7.2.10 <sup>-8</sup>
2	6.9.10 <sup>-8</sup>

Tableau 5.12: Tableau Récapitulatif

Caractéristiques étudiées	valeurs moyennes obtenus	Valeurs recommandées
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	2.39	Maximal
Fluage (mm)	2.72	≤ 8.0
Stabilité (KN)	8.00	≥ 6.0
% des vides de l'air	1.75	(1.5-2.3) %
% des vides des agrégats	21.68	> (16-19) %
Résistance à la compression R20 (kg/cm <sup>2</sup> )	79.62	> 30
Résistance à la compression R50 (kg/cm <sup>2</sup> )	19.90	> 15
Coefficient de stabilité calorifique K <sub>t</sub>	1.50	> 2.5
Coefficient de souplesse K <sub>e</sub>	4.00	< 2.8
Pourcentage d'imbibition (%)	0,391	< 1.50
Pourcentage de gonflement (%)	0.392	< 0.5
Stabilité de Marshall après immersion pendant 14 et 28 jours. (KN)	9.50	> 5.4
Perméabilité (cm/s)	7.05.10 <sup>-8</sup>	5.10 <sup>-10</sup> m/s

**D'après les résultats trouvés on peut dire que toutes les valeurs sont dans les normes et dans les limites des valeurs recommandées. Reste maintenant la vérification de la stabilité des éprouvettes sur le talus.**

#### 5.3.3.4.6 Vérification de la stabilité sur le talus

Pour vérifier la stabilité des revêtements bitumineux posés sur talus, des éprouvettes ont été collées sur un support incliné de 1/1 (pente du barrage de Bouhanifia), (figure 5.18) et placées dans une étuve sous une température de **70°C** (Température maximale sur la surface du masque [48-49] pendant 48 heures, les éprouvettes ne doivent pas se déformer au cours de l'essai. [102]



Figure 5.18: Des éprouvettes placées dans l'étuve

Après les 48 heures de conservation on a obtenu les résultats suivants :

- Après les 48 heures de conservation dans une étuve à une température de 70°C, les éprouvettes ont gardé leur forme initiale. Figure 5.19

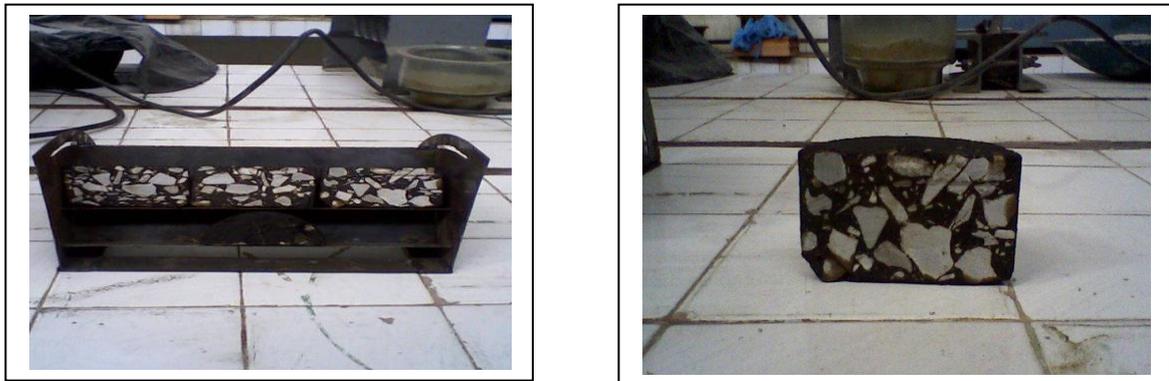


Figure 5.19: Des éprouvettes retirées de l'étuve

#### 5.3.4 Interprétation des résultats

- ✓ D'après la **figure 5.8**, nous remarquons que la courbe granulométrique du mélange est inscrite dans le fuseau recommandé, ce qui nous donne une composition correcte et permet de réduire le pourcentage des vides dans le mélange, cette dernière est la caractéristique la plus importante d'une gâchée en béton bitumineux parce qu'elle assure la perméabilité et la durabilité du béton bitumineux et le protège contre les effets extérieurs, c'est pour cela que nous donnons beaucoup d'importance pour cette caractéristique (on essaye de réduire maximum le pourcentage des vides occupé par l'air). La valeur recommandée est entre (1,5 % – 2,3 %). Pour notre cas d'après le **tableau 5.12**, nous remarquons que la valeur **1.75** est dans les normes.
- ✓ Pour le pourcentage des vides entre les grains, la valeur recommandée doit être supérieure à (16 – 19) % et inférieure à 22 %. D'après le **tableau 5.12**, nous remarquons que le pourcentage de 21.68 % respecte les normes recommandées.
- ✓ Pour la stabilité d'après Marshall, nous remarquons que toutes les éprouvettes ont donné une valeur supérieure à la valeur recommandée (6 KN), pour le fluage les résultats montrent que la valeur trouvée est inférieure à la valeur recommandée (8 mm).

Finalement, concernant la vérification de la stabilité des échantillons sur la pente inclinée, ce qui est le but de cette recherche, nous avons constaté que, après 48 heures de conservation, les échantillons ont gardé leurs formes initiales qui nous ont permis de déterminer que le revêtement en béton bitumineux est bien résisté les températures élevées sans risque de se déformer.

#### **5.4 Conclusion**

L'utilisation des masques en béton bitumineux comme organe d'étanchéité est une technique parfaitement maîtrisée et qui a donné de façon générale d'excellents résultats pour des coûts de travaux compétitifs par rapport aux solutions concurrentes.

Le revêtement complet tel qu'il a été exécuté au barrage Bouhnifia ne présente pas plus de la centième partie du coût de l'ouvrage, même si l'on tient compte des dépenses importantes de mise au point de la méthode et des frais élevés de construction d'un matériel spécial.

Le problème majeur de tel type de masque, est la température sur la surface due au rayonnement solaire, d'après les essais que nous avons menés et les résultats obtenus, nous pouvons dire que le masque en béton bitumineux du barrage Bouhanifia résiste à une température plus de (+70 °C), malgré l'absence de la protection thermique.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier l'amélioration des caractéristiques du masque par le filler en vérifiant son comportement.

## **Chapitre 6**

# **Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

## **6.1 Introduction**

Dans le chapitre précédent, nous avons vérifié la stabilité du masque amont (du barrage Bouhnifia) réalisé en béton bitumineux sur un talus incliné (pente du talus du barrage d'étude) sous une température très élevée, l'étude et les essais ont confirmés que ce masque peut résister aux effets des rayonnements solaires en absence de la couche de protection.

Dans ce chapitre et pour l'amélioration des caractéristiques du béton bitumineux, nous allons changer chaque fois le pourcentage du filler dans le mélange jusqu'à l'obtention d'un meilleur enrobé, ensuite on doit vérifier son comportement mécanique et physique et sa stabilité sur le talus.

## **6.2 Généralité sur le filler**

La plupart des granulats sont composés d'un composite de plusieurs minéraux qui peuvent présenter des caractéristiques très différentes. Leur nature influence l'affinité du liant avec le granulat. En général, les calcaires présentent une bonne adhésivité avec le bitume.

L'angularité des granulats est également un paramètre important, une angularité croissante a pour inconvénient de conduire à des enrobés plus difficiles à compacter, mais de plus en plus stable mécaniquement.

Un filler proprement dit se caractérise par le degré de sa finesse de mouture avec une granulométrie variante de 1 à 80 micromètres. Il intervient dans le mélange par sa nature minéralogique, sa finesse de mouture et son dosage. Le rôle du filler dans le mélange est de combler les vides, de contribuer à une répartition uniforme du liant dans le mélange, d'absorber une grande partie des huiles volatiles du liant, ralentissant donc son vieillissement. [41]

Compte tenu des spécifications précédentes, la teneur totale en filler des granulats doit être comprise entre 5 et 9 %. Cela est nécessaire pour obtenir les pourcentages de vide prescrits. Par ailleurs, pour donner au mélange la meilleure cohésion possible, il est essentiel que le rapport filler/bitume soit maintenu entre 1.1 et 1.4, cette notion du rapport filler/bitume est très importante à retenir encore qu'il faille préciser celui des deux paramètres que l'on fait varier (filler ou au contraire bitume).

En effet, pour une teneur en filler constante, la compacité des mélanges augmente lorsque le rapport filler/bitume diminue. En revanche, pour une teneur en bitume donné et constant, la compacité des mélanges sera d'autant plus élevée que la proportion de filler est importante. Par conséquent, si la compacité est trop élevée au regard des normes prescrites, nous pouvons y remédier soit en diminuant le rapport filler/bitume (à dosage en bitume constant) soit en l'augmentant (à teneur en filler constante). [41]

### 6.3 Étude expérimentale

L'étude a porté sur 5 pourcentages de fillers différents. Pour chaque pourcentage, on a la même teneur en bitume, et pour chaque pourcentage donné, 3 éprouvettes ont été confectionnées.

#### 6.3.1 Analyse granulométriques

La composition granulométrique reportée dans les diagrammes doit correspondre aussi étroitement que possible à la courbe granulométrique moyenne spécifiée pour le matériau. (Figure 6.1) [5-102]

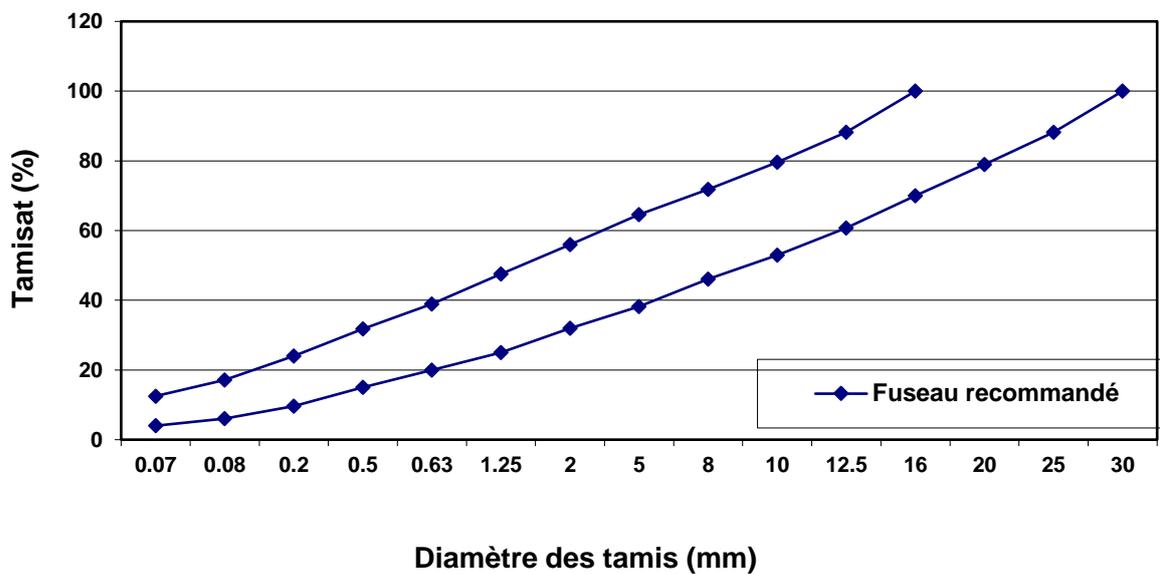


Figure 6.1: Fuseau granulométrique recommandé

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

Essai N°1

Mélange de granulats (46.17% de 2.5/25- 40.83% de 0.1/2.5). Filler 5 %.

Poids initial de l'échantillon : 3600 g

Tableau 6.1 : Analyse granulométrique (Filler 5%)

Diamètre (mm)	Retenus partiels (g)	Retenus partiels (%)	Retenus cumulés (%)	Tamisat (%)
31.0	0	0.00	0.00	<b>100</b>
25.0	44.44	4.444	4.444	<b>95.56</b>
20.0	72.22	7.222	11.67	<b>88.33</b>
16.0	97.22	9.722	21.44	<b>78.61</b>
12.5	94.44	9.444	30.88	<b>69.17</b>
10.0	83.33	8.333	39.21	<b>60.83</b>
8.0	75.00	7.50	46.71	<b>53.33</b>
5.0	75.00	7.50	54.21	<b>45.83</b>
2.0	75.00	7.50	61.71	<b>38.33</b>
1.25	69.44	6.944	68.56	<b>31.39</b>
0.63	55.56	5.556	74.21	<b>25.83</b>
0.5	69.44	6.944	81.16	<b>18.89</b>
0.2	55.56	5.556	86.71	<b>13.33</b>
0.1	83.33	8.333	95.00	<b>5.00</b>
< 0.08	50.00	5.00	100	<b>0.00</b>

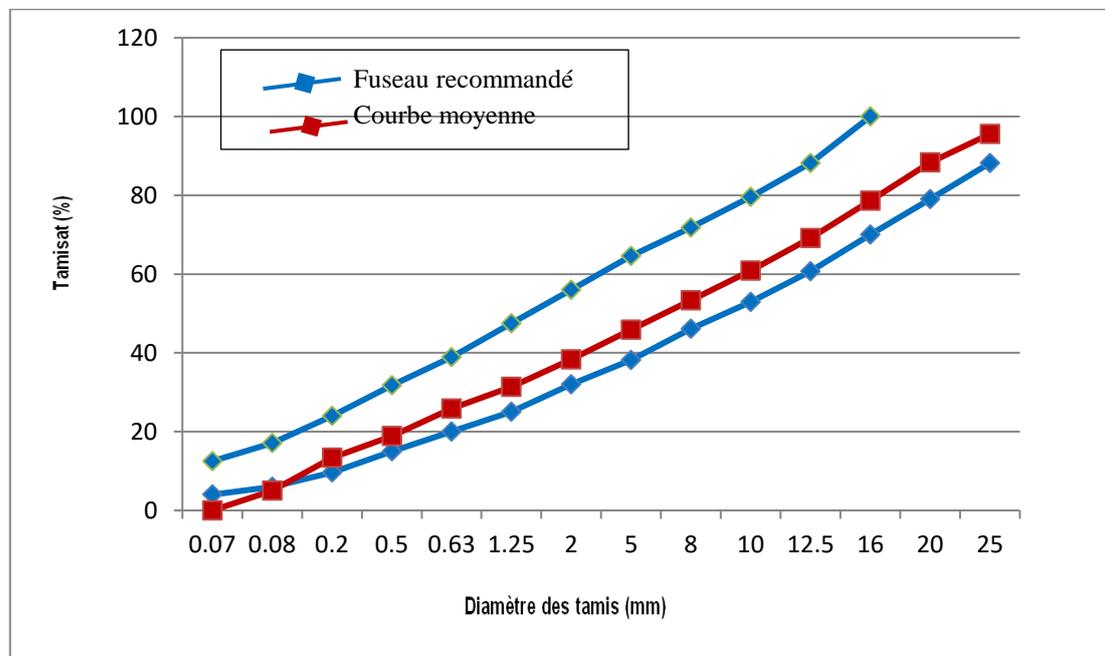


Figure 6.2 : Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 5%)

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

Essai N°2

Mélange de granulats (43.72% de 2.5/25- 40.28% de 0.1/2.5). Filler 8 %.

Poids initial de l'échantillon : 3600 g.

Tableau 6.2 : Analyse granulométrique (Filler 8%)

Diamètre (mm)	Retenus partiels (g)	Retenus partiels (%)	Retenus cumulés (%)	Tamisat (%)
31.0	0	0.00	0.00	100
25.0	41.67	4.167	4.167	95.83
20.0	69.44	6.944	11.11	88.89
16.0	92.22	9.222	20.33	79.67
12.5	91.67	9.167	29.5	70.5
10.0	83.33	8.333	37.83	62.17
8.0	69.44	6.944	44.78	55.22
5.0	69.44	6.944	51.72	48.28
2.0	69.44	6.944	58.67	41.33
1.25	69.44	6.944	65.61	34.39
0.63	55.56	5.556	71.17	28.83
0.5	69.44	6.944	78.11	21.89
0.2	55.56	5.556	83.67	16.33
0.1	83.33	8.333	92	8.00
< 0.08	80.00	8.00	100	0.00

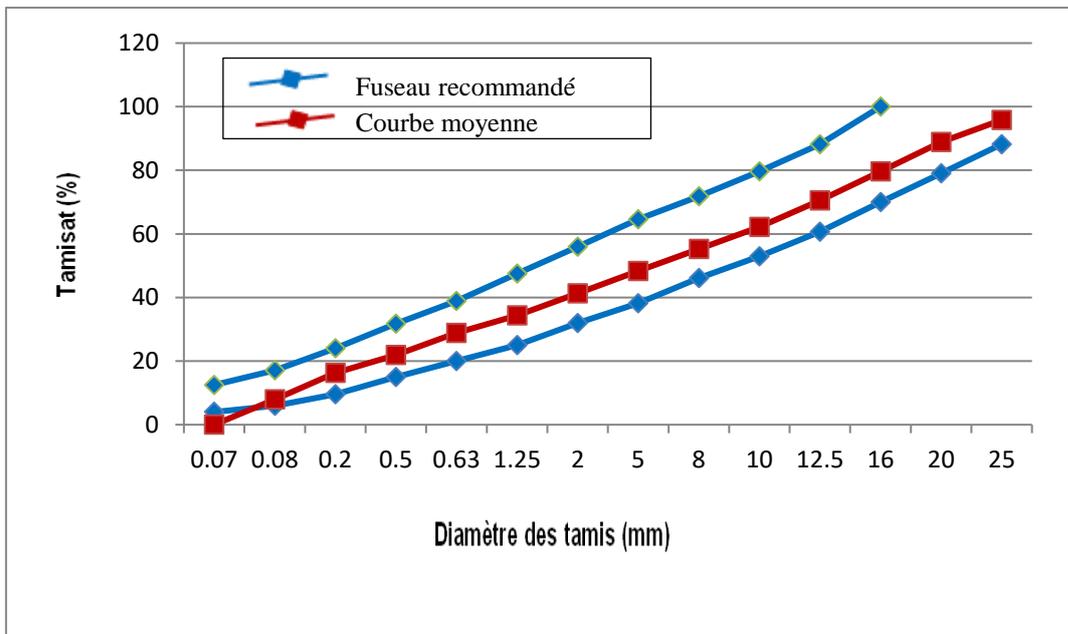


Figure 6.3 : Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 8%)

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

Essai N°3

Mélange de granulats (43.00% de 2.5/25- 39.00% de 0.1/2.5). Filler 10 %.

Poids initial de l'échantillon : 3600 g

Tableau 6.3 : Analyse granulométrique (Filler 10%)

Diamètre (mm)	Retenus partiels (g)	Retenus partiels (%)	Retenus cumulés (%)	Tamisat (%)
31.0	0.00	0.00	0.00	100
25.0	0.00	5.00	5.00	100
20.0	50.00	7.778	12.78	94.00
16.0	77.78	7.778	20.56	87.30
12.5	77.78	6.333	26.89	77.60
10.0	63.33	9.722	36.61	68.00
8.0	97.22	9.722	46.33	60.40
5.0	97.22	8.333	54.67	52.80
2.0	83.33	8.333	62.99	44.00
1.25	83.33	6.944	69.94	37.40
0.63	69.44	5.556	75.50	28.80
0.5	55.56	5.00	80.50	23.00
0.2	50.00	5.00	85.50	17.50
0.1	55.00	5.50	90.00	10.00
< 0.08	100	10.00	100.0	0.00

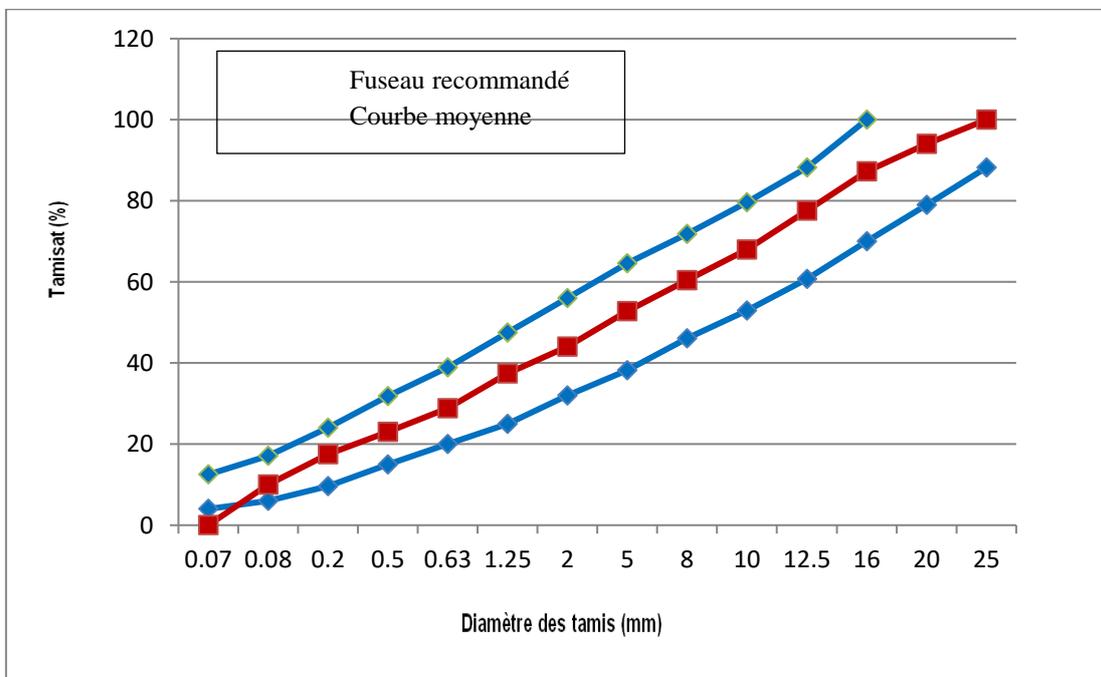


Figure 6.4 : Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 10%)

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

Essai N°4

Mélange de granulats (40.06% de 2.5/25- 36.94% de 0.1/2.5). Filler 15 %.

Poids initial de l'échantillon : 3600 g

Tableau 6.4 : Analyse granulométrique (Filler 15%)

Diamètre (mm)	Retenus partiels (g)	Retenus partiels (%)	Retenus cumulés (%)	Tamisat (%)
31.0	0	0.00	0.00	100
25.0	25.00	2.50	2.5	97.5
20.0	50.00	5.00	7.5	92.5
16.0	77.78	7.778	15.28	84.72
12.5	77.78	7.778	23.06	76.94
10.0	63.33	6.333	29.39	70.61
8.0	97.22	9.722	39.11	60.89
5.0	97.22	9.722	48.83	51.17
2.0	83.33	8.333	57.17	42.83
1.25	83.33	8.333	65.5	34.5
0.63	69.44	6.944	72.44	27.56
0.5	55.56	5.556	77.99	22.00
0.2	50.00	5.00	82.99	17.00
0.1	20.00	2.00	84.99	15.00
< 0.08	150.0	15.00	100	0.00

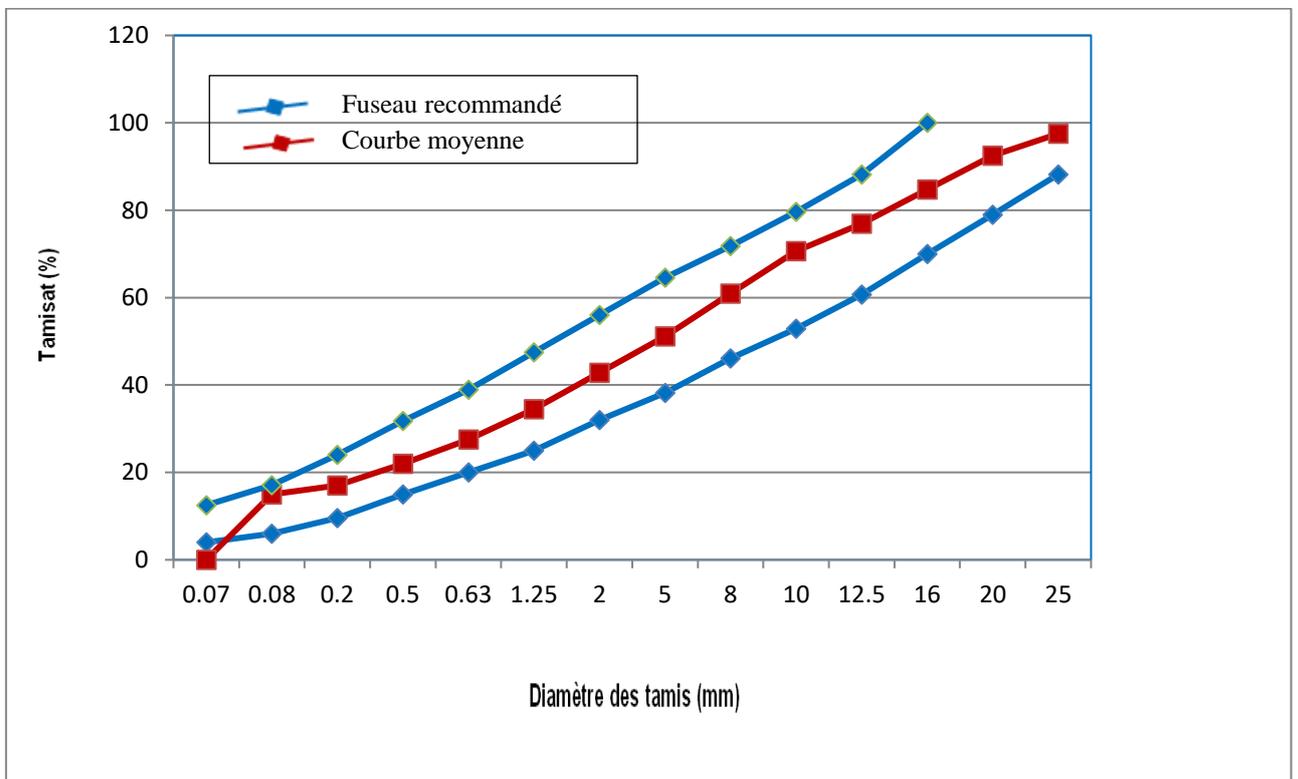


Figure 6.5 : Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 15 %)

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

Essai N°5

Mélange de granulats (37.00% de 2.5/25- 35.00% de 0.1/2.5). Filler 20 %.

Poids initial de l'échantillon : 3600 g

Tableau 6.5 : Analyse granulométrique (Filler 20%)

Diamètre (mm)	Retenus partiels (g)	Retenus partiels (%)	Retenus cumulés (%)	Tamisat (%)
31.0	0	0.00	0.00	100
25.0	22.22	2.222	2.222	97.78
20.0	55.56	5.556	7.778	92.22
16.0	75.00	7.50	15.28	84.72
12.5	83.33	8.333	23.61	76.39
10.0	83.33	8.333	31.94	68.06
8.0	78.78	8.778	40.72	59.28
5.0	83.33	8.333	49.06	50.94
2.0	83.33	8.333	57.39	42.61
1.25	69.44	6.944	64.33	35.67
0.63	69.44	6.944	71.28	28.72
0.5	41.67	4.167	75.44	24.56
0.2	50.00	5.00	85.44	22.00
0.1	50.0	5.00	80.00	20.00
< 0.08	200	20.00	100	0.00

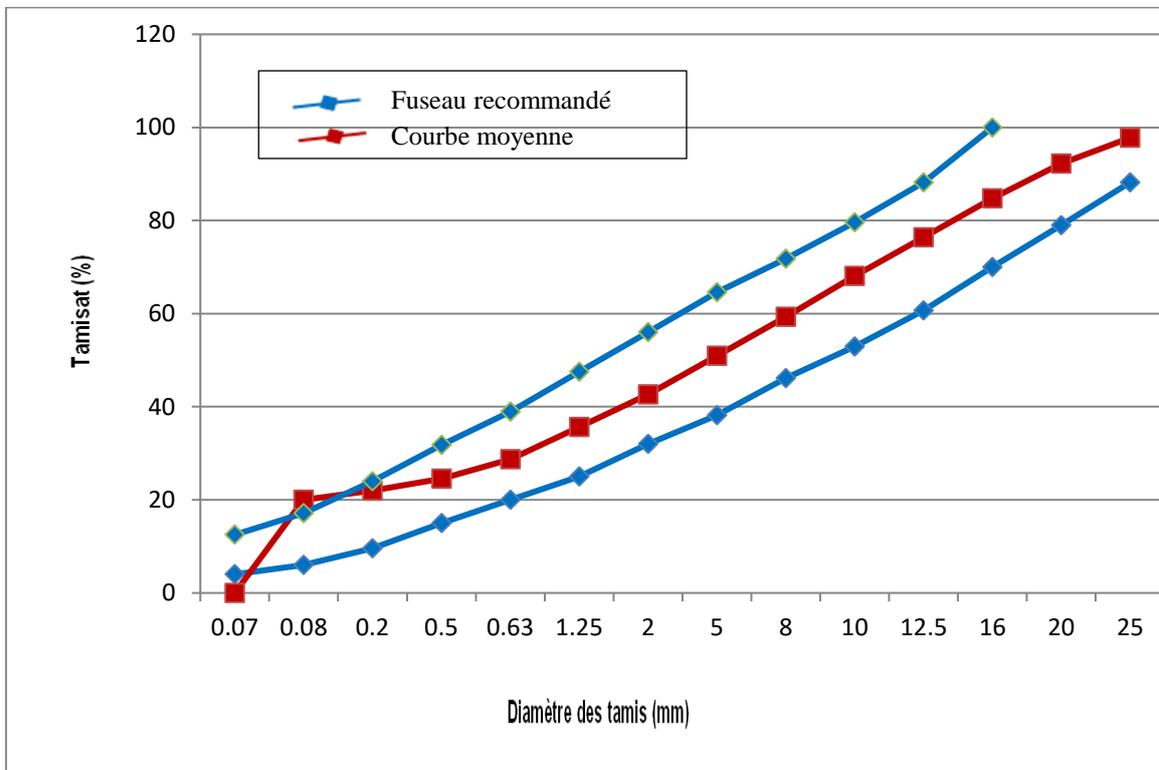


Figure 6.6 : Courbe granulométrique de l'échantillon (Filler 20 %)

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

**6.3.2 Confection des éprouvettes**

L'étude de la composition d'un masque en béton bitumineux et la confection des éprouvettes sont donnés en détail dans le chapitre 5.

**6.3.3 Détermination des propriétés des mélanges bitumineux**

En vue de l'étude préalable de recherche de la meilleure composition à adopter pour la confection d'une gâchée avec des caractéristiques recommandées, [110] On fait des essais sur :

- ✓ La densité apparente.
- ✓ Le pourcentage des vides occupé par l'air.
- ✓ Le pourcentage des vides des agrégats.
- ✓ Le pourcentage des vides occupé par le bitume.
- ✓ La stabilité suivant Marshall.
- ✓ Le fluage.

Les résultats sont donnés aux tableaux suivants :

**Essai N° 1**

- Gros granulat : de 2.5 mm à 25 mm .....46.17 %
- de 0.1 mm à 2.5 mm ..... 40.83 %
- Filler.....5 %
- Bitume 40/50.....8 %

Tableau 6. 6 : Résultats des essais (Filler 5 %)

Echantillons		U	1	2	3	Moyenne	Valeurs recommandées
Poids spécifique totale du granulat	<i>Gsb</i>	/	2.598	2.598	2.598	2.598	
Poids spécifique vrai du granulat	<i>Gse</i>	/	2.650	2.650	2.650	2.650	
Poids spécifique maximum de mélange granula+bitume)	<i>Gmm</i>	/	2.354	2.354	2.354	2.354	
Poids dans l'air sec	<i>P1</i>	g	1257,5	1251,6	1208,1	1239,1	/
Poids dans l'eau	<i>P2</i>	g	700	681,2	673,1	684,77	/
Poids après essorage dans l'air	<i>P3</i>	g	1259,4	1260,6	1217,1	1245,7	/
Poids d'eau absorbé $p3-p1$	<i>W</i>	g	1,9	9	9	6,6333	/
Volume apparent $p1-p2-w$	<i>V</i>	g	555,6	561,4	526	547,67	/
Densité = $P1/V$	<i>Gmb</i>	/	2,263	2,229	2,296	<b>2,262</b>	/
Pourcentage de bitume absorbé du poids de l'agrégats	<i>Pba</i>	%	0.77	0.77	0.77	<b>0.77</b>	/
Pourcentage de bitume vrai absorbé $Pbe = pb - \left(\frac{Pba * ps}{100}\right)$	<i>Pbe</i>	%	7.29	7.29	7.29	<b>7.29</b>	/
Pourcentage des vides des agrégats $Vma = 100 - \left(\frac{Gmb * ps}{Gsb}\right)$	<i>Vma</i>	%	19,87	21,07	18.7	<b>19.88</b>	> (16-19) %
Pourcentage des vides de l'air $Va = 100\left(\frac{Gmm - Gmb}{Gmm}\right)$	<i>Va</i>	%	3,86	5,30	2.45	<b>3.87</b>	(1.5-2.3) %
Stabilité	/	KN	7.4	7.2	7.7	<b>7.43</b>	≥ 6.0
Fluage	/	mm	5.0	5.6	4.5	<b>5.03</b>	≤ 8.0

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux  
du barrage Bouhnifia par le filler**

**Essai N° 2**

- Gros granulat : de 2.5 mm à 25 mm .....43.72 %
- de 0.1 mm à 2.5 mm ..... 40.28 %
- Filler.....8 %
- Bitume 40/50.....8 %

Tableau 6. 7 : Résultats des essais (Filler 8 %)

Echantillons		U	1	2	3	Moyenne	Valeurs recommandées
Poids spécifique totale du granulat	<i>Gsb</i>	/	2.601	2.601	2.601	2.601	
Poids spécifique vrai du granulat	<i>Gse</i>	/	2.650	2.650	2.650	2.650	
Poids spécifique maximum de mélange granula+bitume)	<i>Gmm</i>	/	2.354	2.354	2.354	2.354	
Poids dans l'air sec	<i>P1</i>	g	1135,8	1155,2	1191,6	1160,86	/
Poids dans l'eau	<i>P2</i>	g	645	650	675	660	/
Poids après essorage dans l'air	<i>P3</i>	g	1139,1	1157,2	1195,9	1164,06	/
Poids d'eau absorbé $p3-p1$	<i>W</i>	g	3,3	2	4,3	3,2	/
Volume apparent $p1-p2-w$	<i>V</i>	g	487,5	503,2	512,3	497,66	/
Densité = $P1/V$	<i>Gmb</i>	/	2,329	2,296	2,325	<b>2,317</b>	/
Pourcentage de bitume absorbé du poids de l'agrégats	<i>Pba</i>	%	0,72	0,72	0,72	<b>0,72</b>	/
Pourcentage de bitume vrai absorbé $Pbe = pb - \left(\frac{Pba * ps}{100}\right)$	<i>Pbe</i>	%	7.33	7.33	7.33	<b>7.33</b>	/
Pourcentage des vides des agrégats $Vma = 100 - \left(\frac{Gmb * ps}{Gsb}\right)$	<i>Vma</i>	%	17.64	18.80	17.78	<b>18.07</b>	> (16-19) %
Pourcentage des vides de l'air $Va = 100\left(\frac{Gmm - Gmb}{Gmm}\right)$	<i>Va</i>	%	1.05	2.46	1.22	<b>1.56</b>	(1.5-2.3) %
Stabilité	/	KN	12	11	11.5	<b>11.50</b>	≥ 6.0
Fluage	/	mm	3.5	5.5	5.3	<b>4.77</b>	≤ 8.0

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux  
du barrage Bouhnifia par le filler**

**Essai N° 3**

- Gros granulat : de 2.5 mm à 25 mm .....43.00 %
- de 0.1 mm à 2.5 mm ..... 39.00 %
- Filler.....10 %
- Bitume 40/50.....8 %

Tableau 6. 8 : Résultats des essais (Filler 10 %)

Echantillons		U	1	2	3	Moyenne	Valeurs recommandées
Poids spécifique totale du granulat	<i>Gsb</i>	/	2.600	2.600	2.600	2.600	
Poids spécifique vrai du granulat	<i>Gse</i>	/	2.650	2.650	2.650	2.650	
Poids spécifique maximum de mélange granula+bitume)	<i>Gmm</i>	/	2.354	2.354	2.354	2.354	
Poids dans l'air sec	<i>P1</i>	g	1162,8	1168	1168,8	1166,5	/
Poids dans l'eau	<i>P2</i>	g	665,7	662	663	663,57	/
Poids après essorage dans l'air	<i>P3</i>	g	1163	1170,8	1169,4	1167,7	/
Poids d'eau absorbé $p3-p1$	<i>W</i>	g	0,2	2,8	0,6	1,2	/
Volume apparent $p1-p2-w$	<i>V</i>	g	496,9	503,2	505,2	501,77	/
Densité = $P1/V$	<i>Gmb</i>	/	2,340	2,321	2,313	<b>2,324</b>	/
Pourcentage de bitume absorbé du poids de l'agrégats	<i>Pba</i>	%	0,74	0,74	0,74	<b>0,74</b>	/
Pourcentage de bitume vrai absorbé $Pbe = pb - \left(\frac{Pba * ps}{100}\right)$	<i>Pbe</i>	%	7.32	7.32	7.32	<b>7.32</b>	/
Pourcentage des vides des agrégats $Vma = 100 - \left(\frac{Gmb * ps}{Gsb}\right)$	<i>Vma</i>	%	17.22	17.89	18.17	<b>17.76</b>	> (16-19) %
Pourcentage des vides de l'air $Va = 100\left(\frac{Gmm - Gmb}{Gmm}\right)$	<i>Va</i>	%	0.59	1.39	1.73	<b>1.24</b>	(1.5-2.3) %
Stabilité	/	KN	11	10.3	10	<b>10.43</b>	≥ 6.0
Fluage	/	mm	5.5	5.5	5.7	<b>5.57</b>	≤ 8.0

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

**Essai N° 4**

- Gros granulat : de 2.5 mm à 25 mm .....40.06 %
- de 0.1 mm à 2.5 mm ..... 36.94 %
- Filler.....15 %
- Bitume 40/50.....8 %

Tableau 6. 9 : Résultats des essais (Filler 15 %)

Echantillons		U	1	2	3	Moyenne	Valeurs recommandées
Poids spécifique totale du granulat	<i>Gsb</i>	/	2.605	2.605	2.605	2.605	
Poids spécifique vrai du granulat	<i>Gse</i>	/	2.650	2.650	2.650	2.650	
Poids spécifique maximum de mélange granula+bitume)	<i>Gmm</i>	/	2.354	2.354	2.354	2.354	
Poids dans l'air sec	<i>P1</i>	g	1181,1	1195,5	1174,4	1183,66	/
Poids dans l'eau	<i>P2</i>	g	670	680	670	673,33	/
Poids après essorage dans l'air	<i>P3</i>	g	1186,1	1199,8	1178,3	1188,06	/
Poids d'eau absorbé $p3-p1$	<i>W</i>	g	5	4,3	3,9	4,4	/
Volume apparent $p1-p2-w$	<i>V</i>	g	506,1	511,2	500,5	505,93	/
Densité = $P1/V$	<i>Gmb</i>	/	2,347	2,348	2,346	<b>2,347</b>	/
Pourcentage de bitume absorbé du poids de l'agrégats	<i>Pba</i>	%	0,68	0,68	0,68	<b>0,68</b>	/
Pourcentage de bitume vrai absorbé $Pbe = pb - \left(\frac{Pba * ps}{100}\right)$	<i>Pbe</i>	%	7.38	7.38	7.38	<b>7.38</b>	/
Pourcentage des vides des agrégats $Vma = 100 - \left(\frac{Gmb * ps}{Gsb}\right)$	<i>Vma</i>	%	17.10	17.07	17.14	<b>17.10</b>	> (16-19) %
Pourcentage des vides de l'air $Va = 100\left(\frac{Gmm - Gmb}{Gmm}\right)$	<i>Va</i>	%	0.29	0.25	0.33	<b>0.29</b>	(1.5-2.3) %
Stabilité	/	KN	9.0	9.0	8.0	<b>8.67</b>	≥ 6.0
Fluage	/	mm	6	6.5	6	<b>6.17</b>	≤ 8.0

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux  
du barrage Bouhnifia par le filler**

**Essai N° 5**

- Gros granulat : de 2.5 mm à 25 mm .....37.00 %
- de 0.1 mm à 2.5 mm ..... 35.00 %
- Filler.....20 %
- Bitume 40/50.....8 %

Tableau 6.10 : Résultats des essais (Filler 20 %)

Echantillons		U	1	2	3	Moyenne	Valeurs recommandées
Poids spécifique totale du granulat	<i>Gsb</i>	/	2.608	2.608	2.608	<b>2.608</b>	
Poids spécifique vrai du granulat	<i>Gse</i>	/	2.650	2.650	2.650	<b>2.650</b>	
Poids spécifique maximum de mélange granula+bitume)	<i>Gmm</i>	/	2.354	2.354	2.354	<b>2.354</b>	
Poids dans l'air sec	<i>P1</i>	g	1190,5	1197,5	1191,3	1193,1	/
Poids dans l'eau	<i>P2</i>	g	679	685,3	682,4	682,23	/
Poids après essorage dans l'air	<i>P3</i>	g	1195,2	1199,8	1193,2	1196,06	/
Poids d'eau absorbé $p3-p1$	<i>W</i>	g	4,7	2,3	1,9	2,9	/
Volume apparent $p1-p2-w$	<i>V</i>	g	506,8	509,9	507	507,9	/
Densité = $P1/V$	<i>Gmb</i>	/	2,349	2,348	2,349	<b>2,349</b>	/
Pourcentage de bitume absorbé du poids de l'agrégats	<i>Pba</i>	%	0,63	0,63	0,63	<b>0,63</b>	/
Pourcentage de bitume vrai absorbé $Pbe = pb - \left(\frac{Pba * ps}{100}\right)$	<i>Pbe</i>	%	7.42	7.42	7.42	<b>7.42</b>	/
Pourcentage des vides des agrégats $Vma = 100 - \left(\frac{Gmb * ps}{Gsb}\right)$	<i>Vma</i>	%	18.00	18.00	18.00	<b>18.00</b>	> (16-19) %
Pourcentage des vides de l'air $Va = 100\left(\frac{Gmm - Gmb}{Gmm}\right)$	<i>Va</i>	%	0.20	0.20	0.20	<b>0.20</b>	(1.5-2.3) %
Stabilité	/	KN	6.5	6.0	6.5	<b>6.33</b>	≥ 6.0
Fluage	/	mm	10.5	10	10.5	<b>10.33</b>	≤ 8.0

Tableau 6.11 : Résultats des essais (tableau récapitulatif)

% de bitume	% de Filler	Densité g/cm <sup>3</sup>	% des vides de l'air	% des vides des agrégats	Stabilité (kn)	Fluage (mm)
8	5	2,262	3.87	19.88	7.43	5.03
	8	2,317	1.56	18.07	11.50	4.77
	10	2,324	1.24	17.76	10.33	5.57
	15	2,347	0.29	17.10	8.67	6.17
	20	2,349	0.20	18.00	6.33	10.33

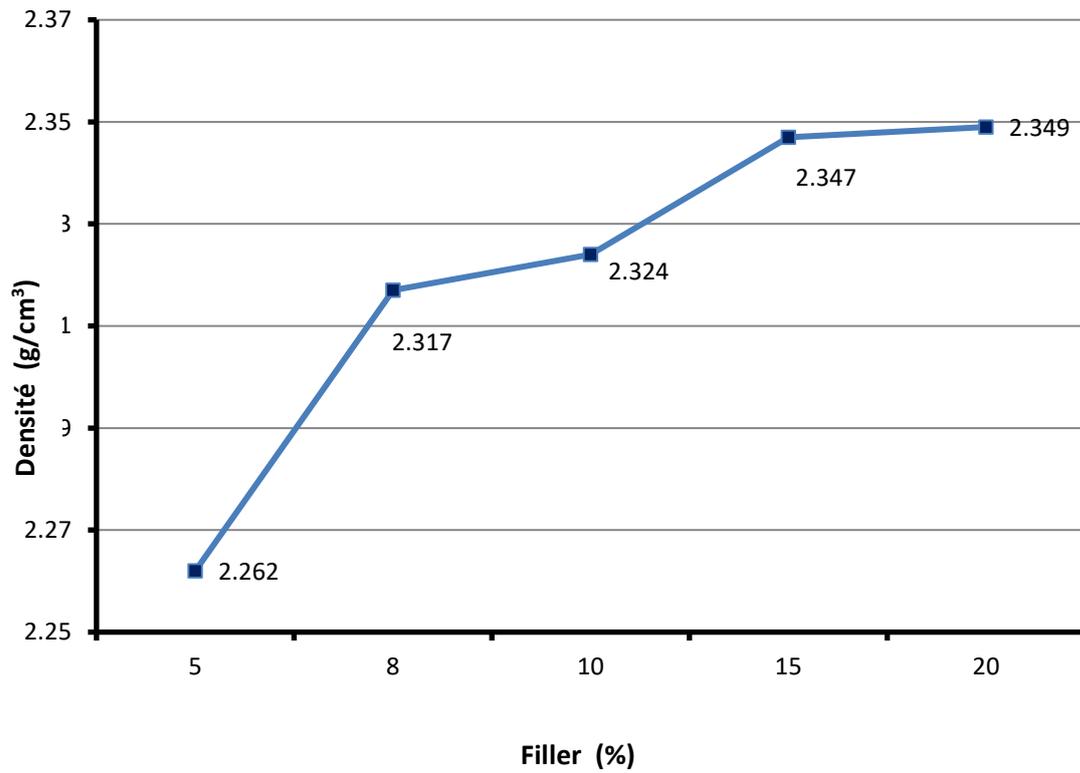


Figure 6.7 : Variation de la densité en fonction de filler

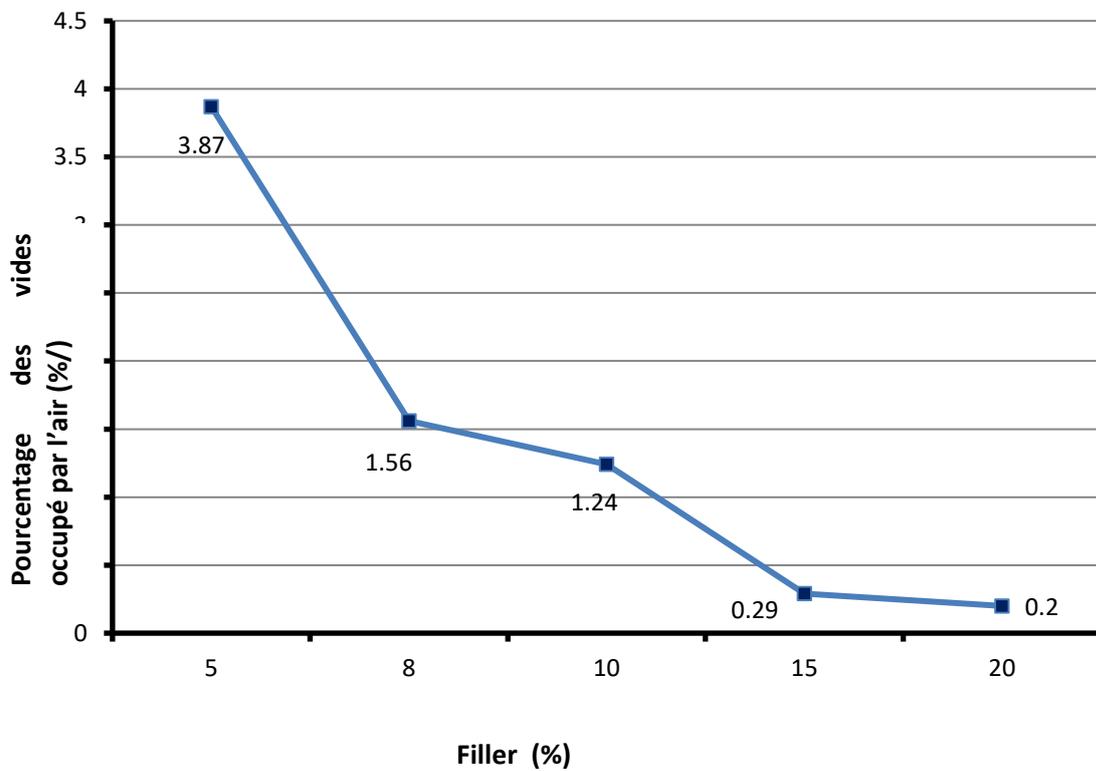


Figure 6.8 : Variation du pourcentage des vides occupé par l'air en fonction de filler

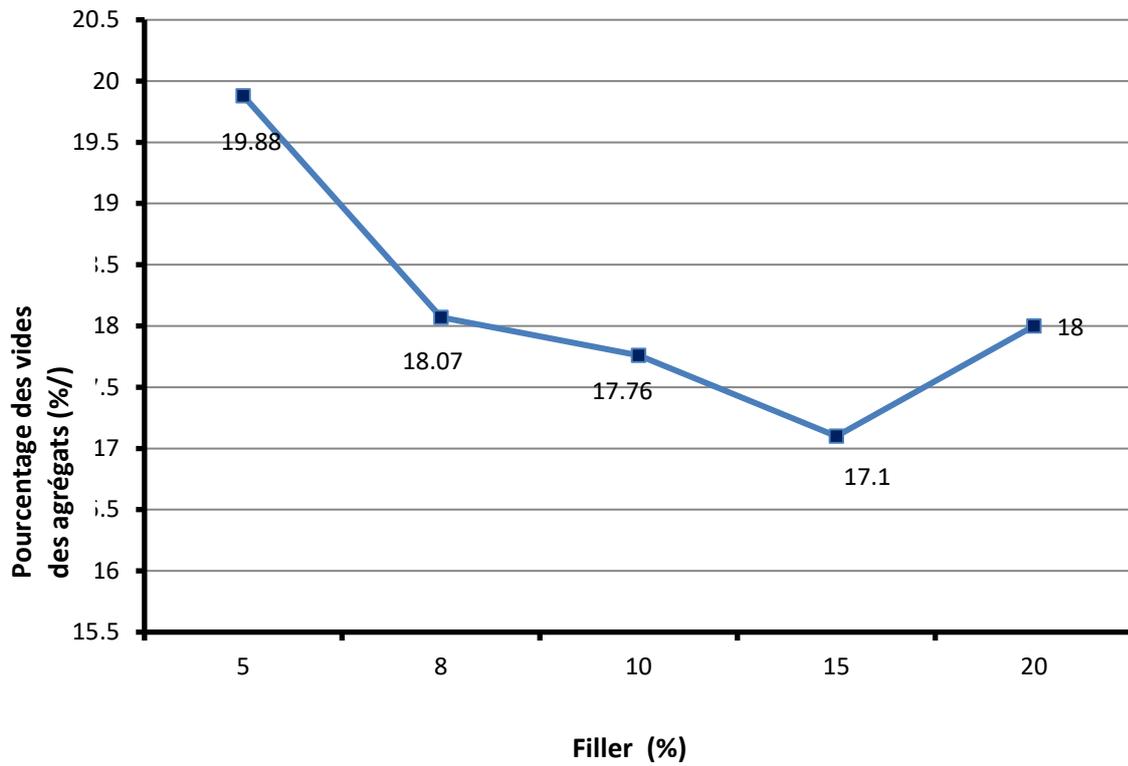


Figure 6.9 : Variation du pourcentage des vides des agrégats en fonction de filler

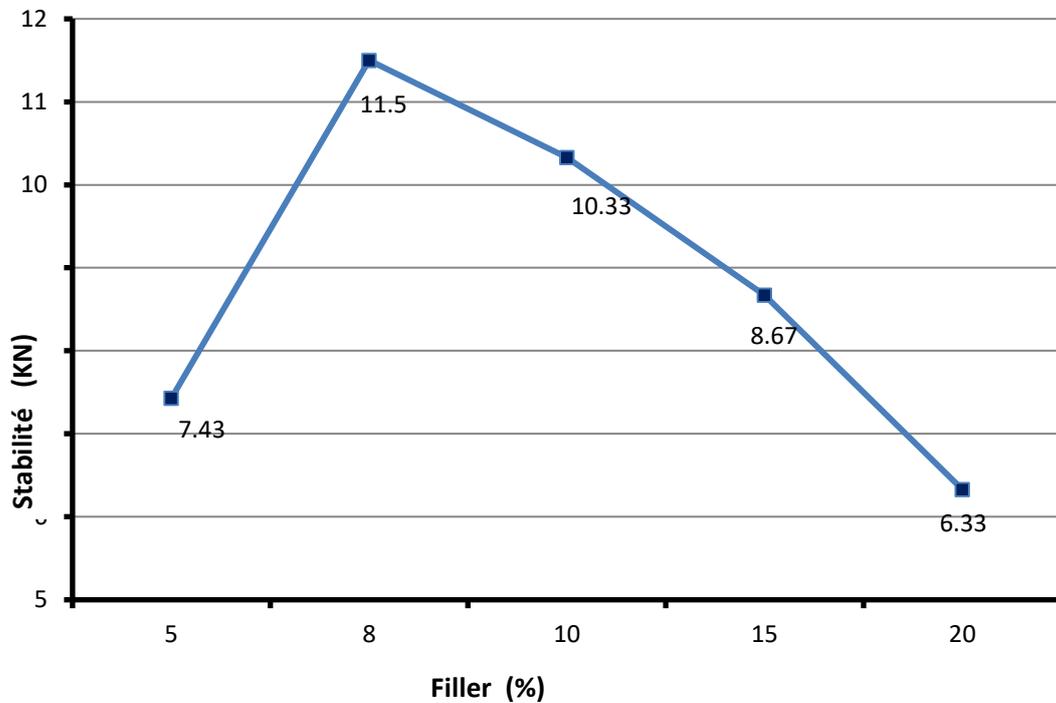


Figure 6.10 : Variation de la stabilité en fonction de filler

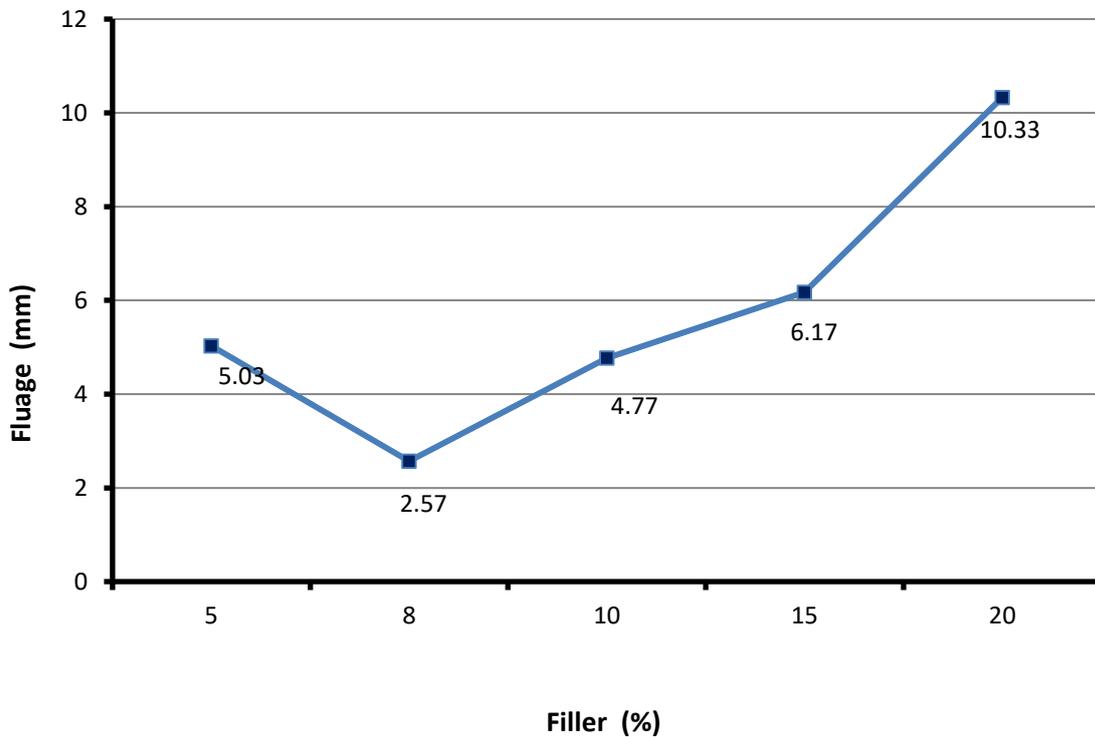


Figure 6.11 : Variation du fluage en fonction de filler

D'après le **tableau 6.11** peut dire que les résultats obtenus sont conformes aux normes recommandées. [20-110]

Le pourcentage des vides de l'air concernant le pourcentage de filler 5 %, est plus grand, c'est pour cela, on a éliminé ce pourcentage dans le reste des essais, on doit maintenant faire des analyses sur : La Résistance à la compression ;

- ✓ Le Pourcentage d'imbibition ;
- ✓ Le Pourcentage de gonflement ;
- ✓ La Stabilité suivant Marshall après immersion de 14 et 28 jours ;
- ✓ La Perméabilité ;
- ✓ La Stabilité sur talus.

**Les résultats obtenus sont donnés aux tableaux suivants :**

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux  
du barrage Bouhnifia par le filler**

**Essai N° 1 : Résistance à la compression**

Tableau 6.12 : Résistance à la compression (Filler 8 %)

Echantillon		U	1	2	3	Valeurs recommandées
Diamètre	D	cm	8.0	8.0	8.0	/
Hauteur	H	cm	10.0	10.0	10.0	/
Poids	P	g	1002.7	997.0	1002.9	/
Section	S	cm <sup>2</sup>	50.24	50.24	50.24	
Charge appliqué	P	kg	7000	5500	1500	
Résistance R0 à 0°C	R0	Kg/cm <sup>2</sup>	139.33	/	/	/
Résistance R20 à 20°C	R20	Kg/cm <sup>2</sup>	/	109.47	/	> 30 kg/cm <sup>2</sup>
Résistance R50 à 50°C	R50	Kg/cm <sup>2</sup>	/	/	29.86	> 15 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficient de souplesse	Ke	/	= R0/R20 = 1.27			< 2.8
Coefficient de la stabilité calorifique	Kt	/	= R20/R50 = 3.67			> 2.5

Tableau 6.13 : Résistance à la compression (Filler 10 %)

Echantillon		U	1	2	3	Valeurs recommandées
Diamètre	D	cm	8.0	8.0	8.0	/
Hauteur	H	cm	10.0	10.0	10.0	/
Poids	P	g	1002.7	997.0	1002.9	/
Section	S	cm <sup>2</sup>	50.24	50.24	50.24	
Charge appliqué	P	kg	6000	4000	1000	
Résistance R0 à 0°C	R0	Kg/cm <sup>2</sup>	119.43	/	/	/
Résistance R20 à 20°C	R20	Kg/cm <sup>2</sup>	/	79.62	/	> 30 kg/cm <sup>2</sup>
Résistance R50 à 50°C	R50	Kg/cm <sup>2</sup>	/	/	19.90	> 15 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficient de souplesse	Ke	/	= R0/R20 = 1.50			< 2.8
Coefficient de la stabilité calorifique	Kt	/	= R20/R50 = 4.00			> 2.5

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

Tableau 6.14 : Résistance à la compression (Filler 15 %)

Echantillon		U	1	2	3	Valeurs recommandées
Diamètre	D	cm	8.0	8.0	8.0	/
Hauteur	H	cm	8.0	8.0	8.0	/
Poids	P	g	974.1	941.3	981	/
Section	S	cm <sup>2</sup>	50.24	50.24	50.24	
Charge appliqué	P	kg	6500	5000	1000	
Résistance R0 à 0°C	R0	Kg/cm <sup>2</sup>	129.38	/	/	/
Résistance R20 à 20°C	R20	Kg/cm <sup>2</sup>	/	99.52	/	> 30 kg/cm <sup>2</sup>
Résistance R50 à 50°C	R50	Kg/cm <sup>2</sup>	/	/	19.90	> 15 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficient de souplesse	Ke	/	= R0/R20 = 1.30			< 2.8
Coefficient de la stabilité calorifique	Kt	/	= R20/R50 = 5.00			> 2.5

Tableau 6.15 : Résistance à la compression (Filler 20 %)

Echantillon		U	1	2	3	Valeurs recommandées
Diamètre	D	cm	8.0	8.0	8.0	/
Hauteur	H	cm	8.0	8.0	8.0	/
Poids	P	g	970.0	935.5	975.2	/
Section	S	cm <sup>2</sup>	50.24	50.24	50.24	
Charge appliqué	P	kg	5500	4500	1000	
Résistance R0 à 0°C	R0	Kg/cm <sup>2</sup>	109.47	/	/	/
Résistance R20 à 20°C	R20	Kg/cm <sup>2</sup>	/	89.57	/	> 30 kg/cm <sup>2</sup>
Résistance R50 à 50°C	R50	Kg/cm <sup>2</sup>	/	/	19.90	> 15 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficient de souplesse	Ke	/	= R0/R20 = 1.22			< 2.8
Coefficient de la stabilité calorifique	Kt	/	= R20/R50 = 4.50			> 2.5

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

---

**Essai N° 2 : Pourcentage d'imbibition**

Tableau 6.16: Pourcentage d'imbibition (Filler 8 %)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	P <sub>0</sub>	g	1175.15	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	P <sub>h14</sub>	g	1179.75	/
Pourcentage d'imbibition	/	%	<b>0.391</b>	< 1.5 %

Tableau 6.17: Pourcentage d'imbibition (Filler 10 %)

Echantillon		U	7	Valeurs recommandées
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	P <sub>0</sub>	g	1175.8	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	P <sub>h14</sub>	g	1180.9	/
Pourcentage d'imbibition	/	%	0.434	< 1.5 %

Tableau 6.18: Pourcentage d'imbibition (Filler 15 %)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	P <sub>0</sub>	g	1181.6	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	P <sub>h14</sub>	g	1186.6	/
Pourcentage d'imbibition	/	%	<b>0.423</b>	< 1.5 %

Tableau 6.19: Pourcentage d'imbibition (Filler 20 %)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	P <sub>0</sub>	g	1186.6	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	P <sub>h14</sub>	g	1186.9	/
Pourcentage d'imbibition	/	%	<b>0.025</b>	< 1.5 %

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

---

**Essai N° 3 : Pourcentage de gonflement**

Tableau 6.20: Pourcentage de gonflement (Filler 8 %)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Diamètre avant l'immersion	D	cm	10.2	/
Hauteur avant l'immersion	H	cm	6.3	
Diamètre après 28 jours	D <sub>1</sub>	cm	10.22	/
Hauteur après 28 jours	H <sub>1</sub>	cm	6.3	/
Volume de l'éprouvette avant l'immersion	V <sub>0</sub>	cm <sup>3</sup>	512,00	/
Volume de l'éprouvette après 28 jours	V <sub>h</sub>	cm <sup>3</sup>	514,20	/
Pourcentage de gonflement	/	%	<b>0.430</b>	< 0.5 %

Tableau 6.21: Pourcentage de gonflement (Filler 10 %)

Echantillon		U	8	Valeurs recommandées
Diamètre avant l'immersion	D	cm	10.2	/
Hauteur avant l'immersion	H	cm	6.3	
Diamètre après 28 jours	D <sub>1</sub>	cm	10.22	/
Hauteur après 28 jours	H <sub>1</sub>	cm	6.3	/
Volume de l'éprouvette avant l'immersion	V <sub>0</sub>	cm <sup>3</sup>	514,53	/
Volume de l'éprouvette après 28 jours	V <sub>h</sub>	cm <sup>3</sup>	516,55	/
Pourcentage de gonflement	/	%	<b>0.392</b>	< 0.5 %

Tableau 6.22: Pourcentage de gonflement (Filler 15 %)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Diamètre avant l'immersion	D	cm	10.0	/
Hauteur avant l'immersion	H	cm	6.4	
Diamètre après 28 jours	D <sub>1</sub>	cm	10.0	/
Hauteur après 28 jours	H <sub>1</sub>	cm	6.5	/
Volume de l'éprouvette avant l'immersion	V <sub>0</sub>	cm <sup>3</sup>	502.4	/
Volume de l'éprouvette après 28 jours	V <sub>h</sub>	cm <sup>3</sup>	510.25	/
Pourcentage de gonflement	/	%	<b>1.54</b>	< 0.5 %

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

Tableau 6.23: Pourcentage de gonflement (Filler 20 %)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Diamètre avant l'immersion	D	cm	10.0	/
Hauteur avant l'immersion	H	cm	6.4	
Diamètre après 28 jours	D <sub>1</sub>	cm	10.2	/
Hauteur après 28 jours	H <sub>1</sub>	cm	6.5	/
Volume de l'éprouvette avant l'immersion	V <sub>0</sub>	cm <sup>3</sup>	502.4	/
Volume de l'éprouvette après 28 jours	V <sub>h</sub>	cm <sup>3</sup>	530.86	/
Pourcentage de gonflement	/	%	<b>5.66</b>	< 0.5 %

**Essai N° 4 : Stabilité suivant Marshall après immersion pendant 14 et 28 jours**

Tableau 6.24 : Stabilité (Filler 8%)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Diamètre	D	cm	10.3	/
Hauteur	H	cm	6.2	/
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	P <sub>0</sub>	g	1174.5	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	P <sub>h14</sub>	g	1178.6	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 28 jours	P <sub>h28</sub>	g	1178.7	/
Fluage	/	mm	<b>2.1</b>	≤ 8.0
Stabilité	/	KN	<b>7</b>	≥ 6.0

Tableau 6.25 : Stabilité (Filler 10%)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Diamètre	D	cm	10.3	/
Hauteur	H	cm	6.3	/
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	P <sub>0</sub>	g	1175.8	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	P <sub>h14</sub>	g	1180.9	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 28 jours	P <sub>h28</sub>	g	/	/
Fluage	/	mm	<b>2.85</b>	≤ 8.0
Stabilité	/	KN	<b>12</b>	≥ 6.0

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

Tableau 6.26 : Stabilité (Filler 15%)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	P <sub>0</sub>	g	1181.6	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	P <sub>h14</sub>	g	1186.6	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 28 jours	P <sub>h28</sub>	g	1188.0	/
Fluage	/	mm	<b>5.4</b>	≤ 8.0
Stabilité	/	KN	<b>7.30</b>	≥ 6.0

Tableau 6.27 : Stabilité (Filler 20%)

Echantillon		U	1	Valeurs recommandées
Poids de l'éprouvette avant l'immersion	P <sub>0</sub>	g	1186.6	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 14 jours	P <sub>h14</sub>	g	1186.9	/
Poids de l'éprouvette imbibée après 28 jours	P <sub>h28</sub>	g	1189.2	/
Fluage	/	mm	<b>8.9</b>	≤ 8.0
Stabilité	/	KN	<b>6.00</b>	≥ 6.0

**Essai N° 5 : Perméabilité**

Tableau 6.28 : Perméabilité (Filler 8%)

Echantillon	Perméabilité (cm/s)	valeurs recommandé
1	7.4.10 <sup>-8</sup>	/
2	6.9.10 <sup>-8</sup>	/
Valeur moyenne	<b>7.25.10<sup>-8</sup></b>	≤ <b>5.10<sup>-10</sup></b>

**Chapitre 6 : Amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux du barrage Bouhnifia par le filler**

Tableau 6.29 : Perméabilité (Filler 10 %)

Echantillon	Perméabilité (cm/s)	valeurs recommandé
1	$7.2.10^{-8}$	/
2	$6.9.10^{-8}$	/
Valeur moyenne	<b><math>7.05.10^{-8}</math></b>	$\leq 5.10^{-10}$

Tableau 6.30 : Perméabilité (Filler 15%)

Echantillon	Perméabilité (cm/s)	valeurs recommandé
1	$7.0.10^{-8}$	/
2	$7.0.10^{-8}$	/
Valeur moyenne	<b><math>7.00.10^{-8}</math></b>	$\leq 5.10^{-10}$

Tableau 6.31 : Perméabilité (Filler 20%)

Echantillon	Perméabilité (cm/s)	Valeurs recommandé
1	$6.6.10^{-8}$	/
2	$7.0.10^{-8}$	/
Valeur moyenne	<b><math>6.80.10^{-8}</math></b>	$\leq 5.10^{-10}$

**Tableau 6. 32 : Résultats des essais (tableau récapitulatif)**

% de bitume	% de Filler	Résistance à la compression Kg/cm <sup>2</sup>			% d'imbibition	% De gonflement	Stabilité (kn)	Fluage (mm)	Perméabilité (cm/s)
		0°	20°	50°					
8	8	139.33	109.47	29.86	0.391	0.430	7.00	2.10	7.25
	10	119.43	79.62	19.90	0.434	0.392	12.00	2.85	7.05
	15	129.38	94.52	19.90	0.423	<b>1.54</b>	<b>7.30</b>	<b>5.40</b>	7.00
	20	109.47	89.57	19.90	0.025	<b>5.66</b>	<b>6.00</b>	<b>8.90</b>	6.80

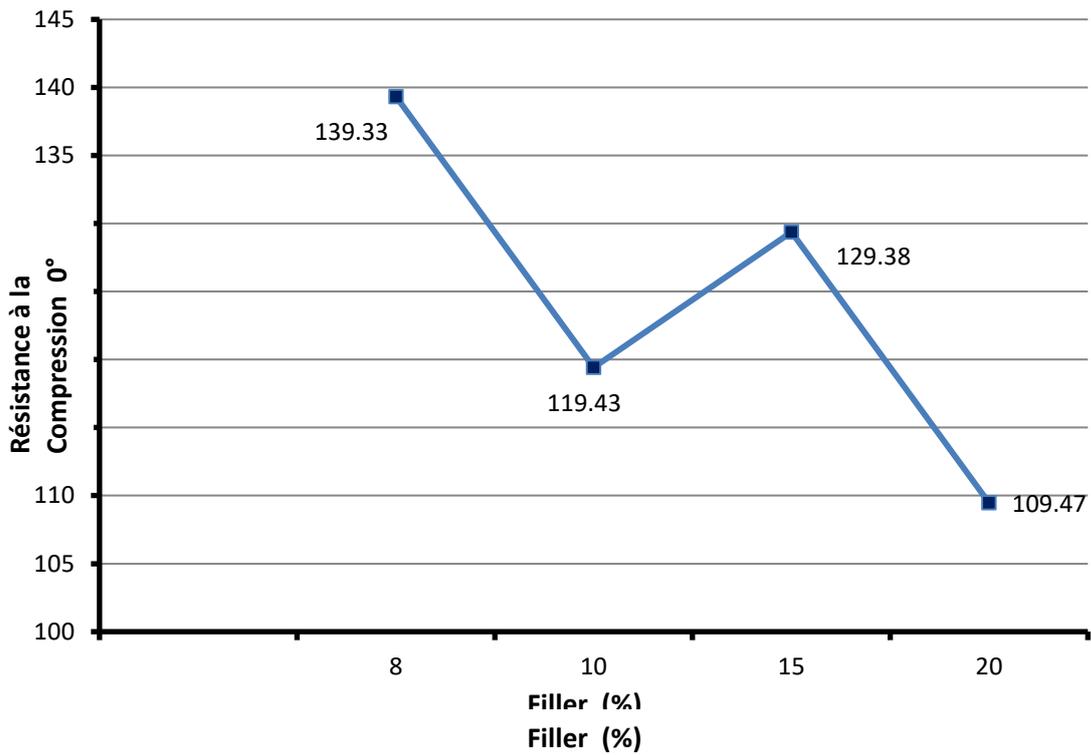


Figure 6.12 : Variation de la résistance à la compression 0° en fonction de filler

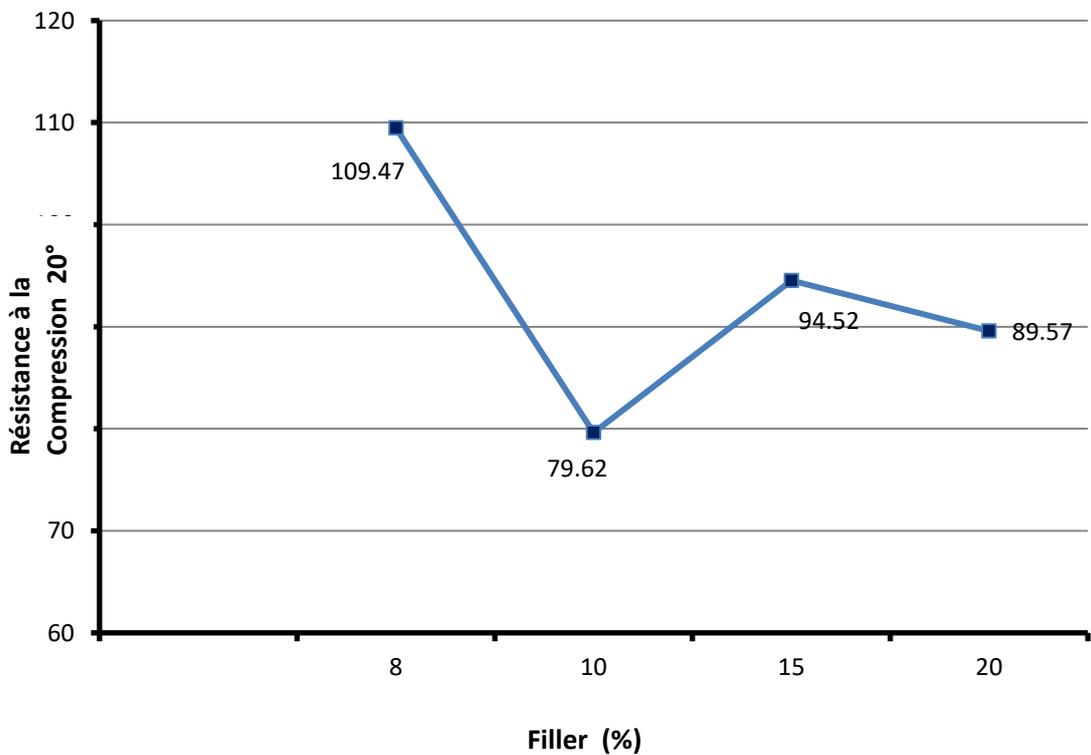


Figure 6.13 : Variation de la résistance à la compression 20° en fonction de filler

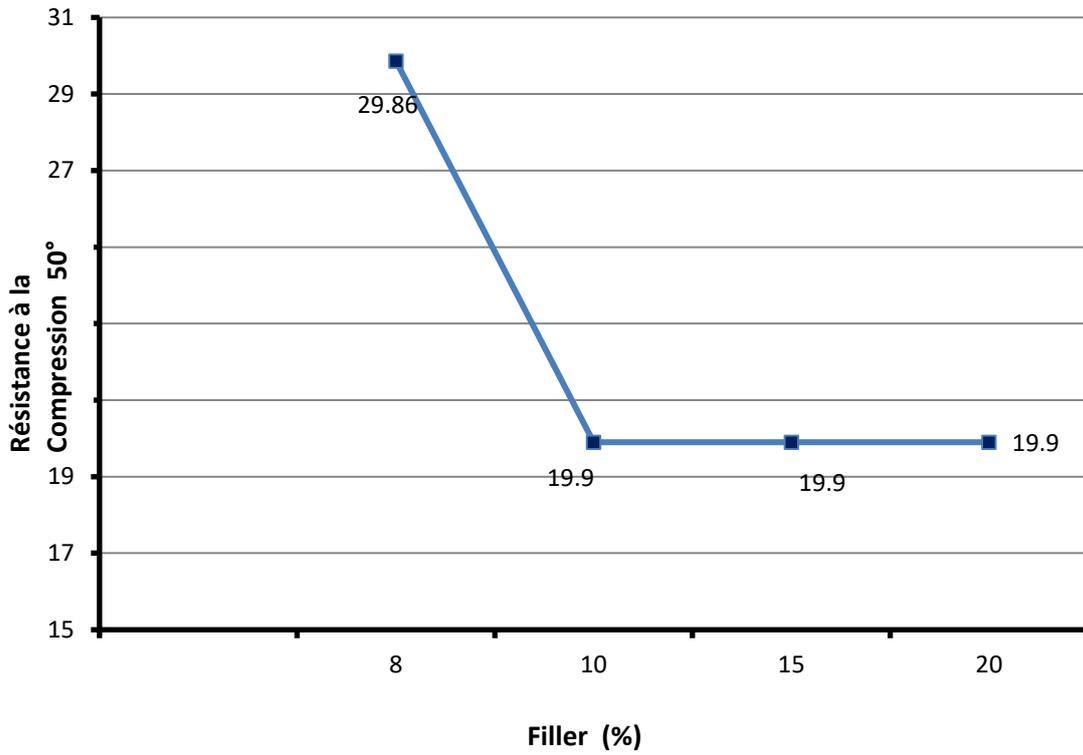


Figure 6.14 : Variation de la résistance à la compression 50° en fonction de filler

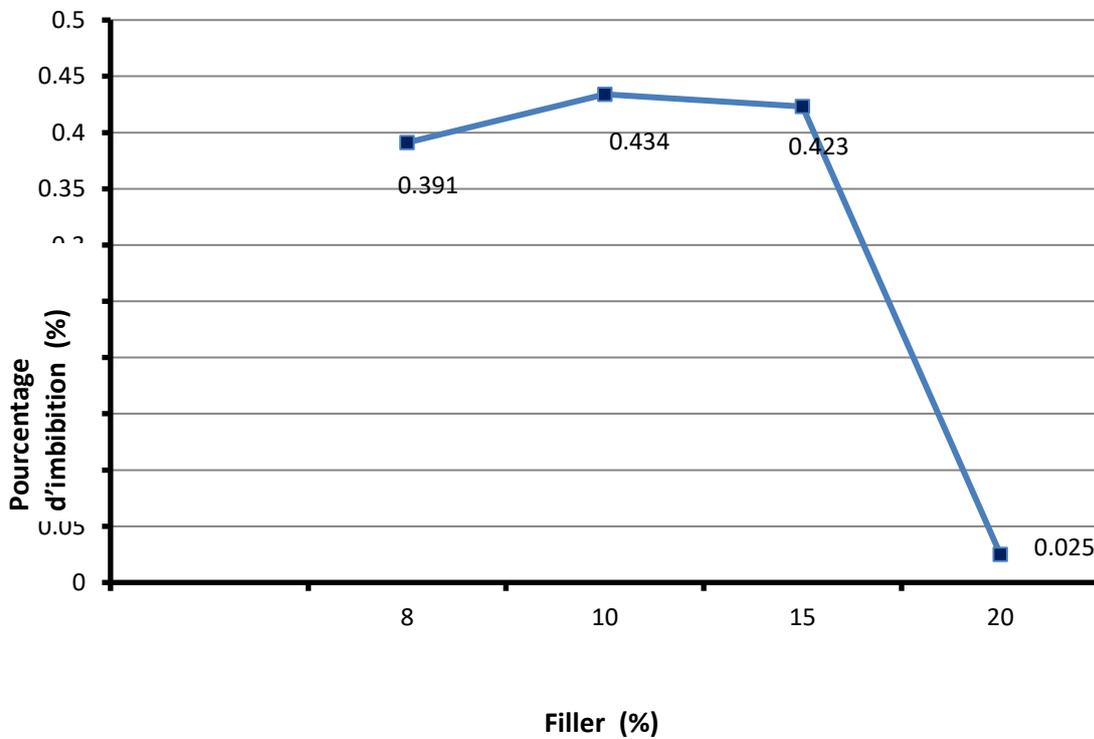


Figure 6.15 : Variation du pourcentage d'imbibition en fonction de filler

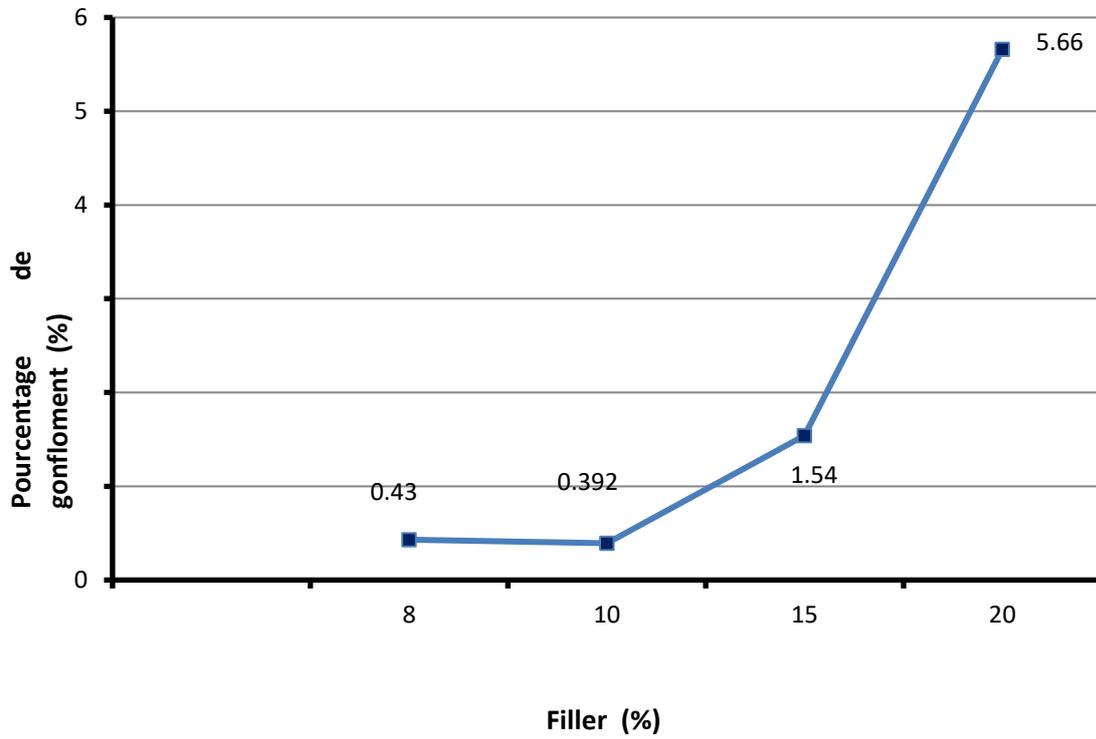


Figure 6.16 : Variation du pourcentage de gonflement en fonction de filler

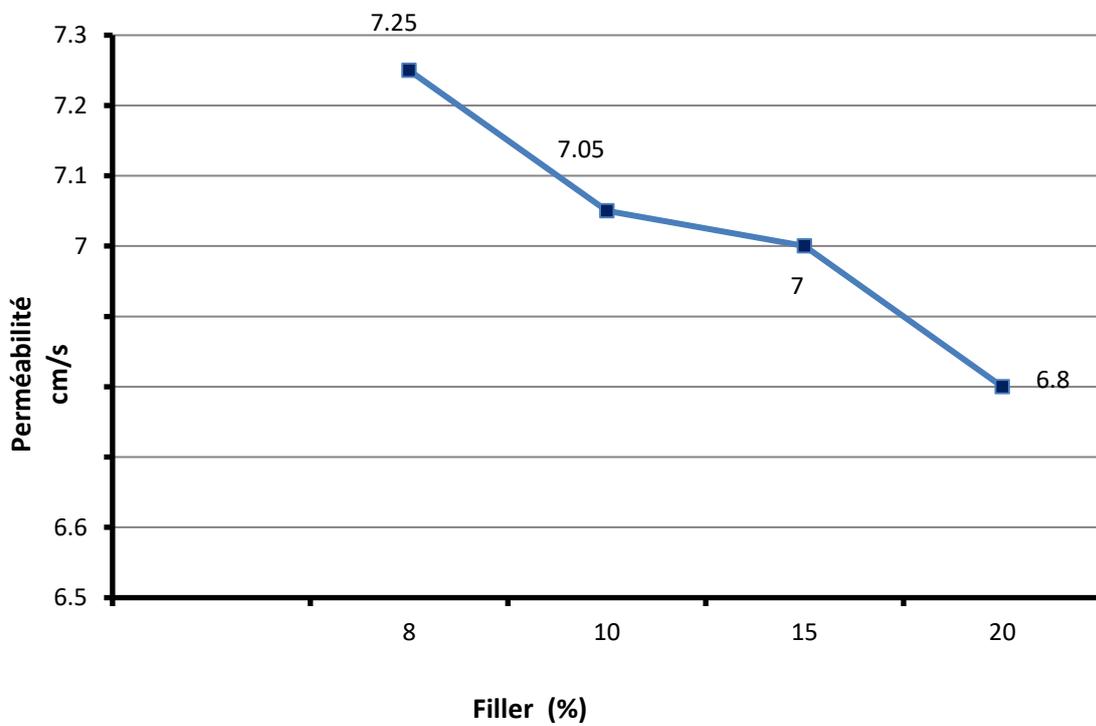


Figure 6.17 : Variation de la perméabilité en fonction de filler

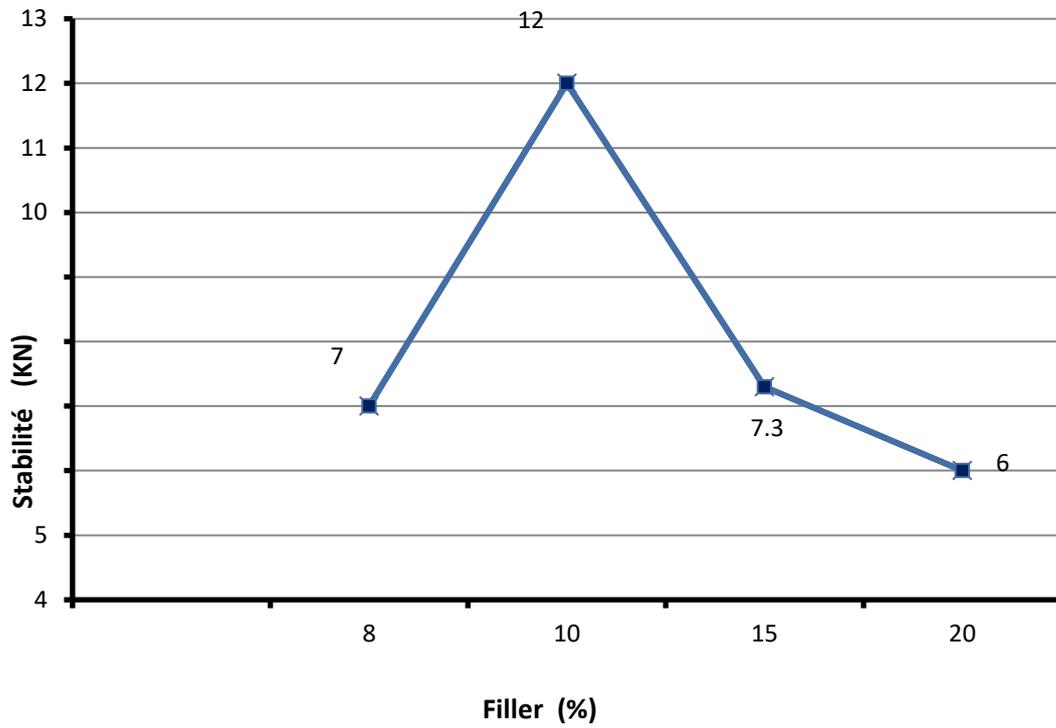


Figure 6.18 : Variation de la stabilité pendant 14 et 28 jours en fonction de filler

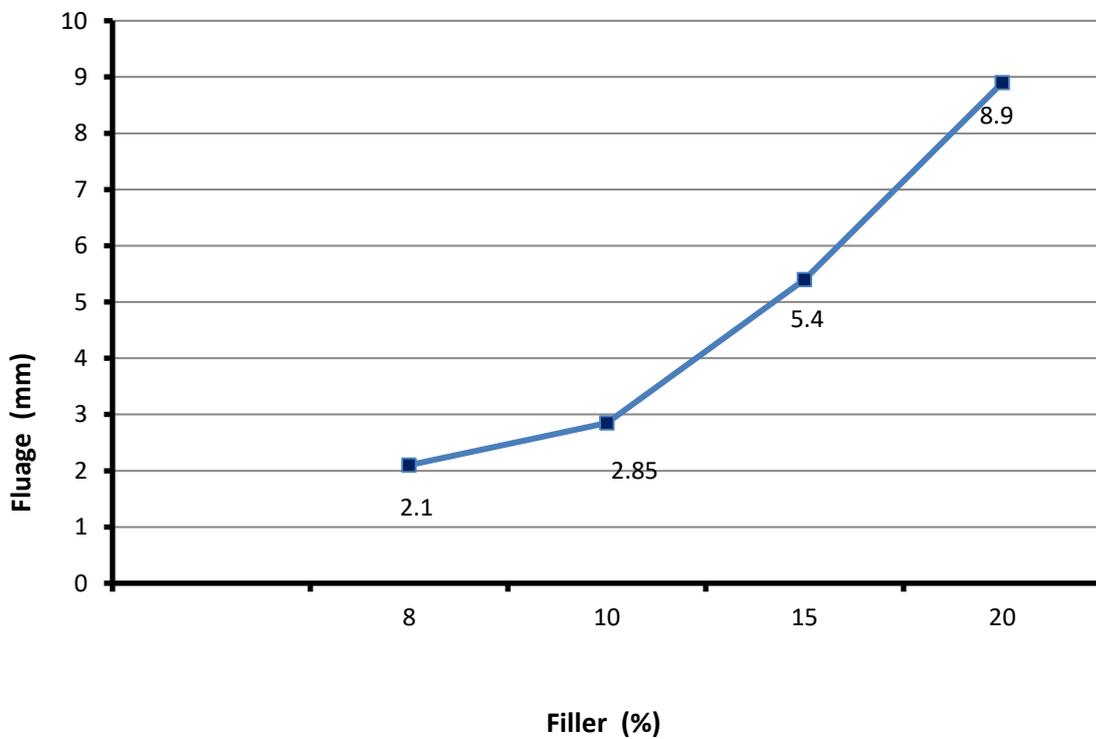


Figure 6.19 : Variation du fluage en fonction de filler

**Essai N° 6 : Vérification de la stabilité sur le talus**

Des éprouvettes de différent pourcentage de filler ont été collées sur un support incliné de 1/1 (pente du barrage de Bouhanifia), et placé dans une étuve sous une température de 70°C (Température maximale sur la surface du masque [48-49] pendant 48 heurs, les éprouvettes ne doivent pas se déformer au cours de l'essai. [102]



Figure 6.20: Des éprouvettes placées dans l'étuve

**Après les 48 heures de conservation on a obtenu les résultats suivants**

- ✓ **Pour un pourcentage du filler de 8% et 10%** les éprouvettes ont gardées leur forme initiale.. (Figure 6.21)
- ✓ **Pour un pourcentage du filler de 15% et 20%** les éprouvettes ont déformées. (Figure 6.22 et 6.23)



Figure 6.21: Des éprouvettes gardées leur forme initiale (filler 8% et 10 %)



Figure 6.22: Des éprouvettes déformées (filler 15%)



Figure 6.23: Des é éprouvettes déformées (filler 20%)

#### **6.4 Interprétation des résultats**

D'après les tableaux 6.11 et 6.32 et les résultats obtenus, on remarque que l'amélioration du béton bitumineux avec des quantités convenables de filler fait :

- Baisser le volume des vides ;
- Rendre le mélange plus dense et imperméable.

Par contre, des quantités excessives de filler fait accroître notablement la demande en bitume en raison de la surface spécifique accrue.

- Augmenter le fluage ;
- Augmenter les pourcentages de gonflement et diminuer la stabilité sur talus.

**Donc, nous pouvons conclure que l'augmentation du pourcentage du filler fait diminuer la stabilité sur les talus sous l'influence de la température.**

#### **6.5 Conclusion**

Le masque en béton bitumineux est certainement la solution la plus facile à réaliser et la plus économique qui peut être conçue pour l'étanchement parfait des barrages en remblai.

Le filler est utilisé pour faciliter la maniabilité et le compactage du mélange, la maniabilité est importante parce que des mélanges rugueux, ayant une faible teneur en fin, tendent à "se déchirer" lors de leur mise en place, l'amélioration de la maniabilité, des quantités convenables de filler font aussi baisser le volume des vides et rendent le mélange plus dense et imperméable

Par contre, des quantités excessives de filler accroîtront notablement la demande en bitume en raison de la surface spécifique accrue et le rendent instable sous l'influence de la température.

## **Chapitre 7**

### **Étude théorique de l'amélioration des caractéristiques du masque amont en béton bitumineux par les polymères**

### **7.1 Introduction**

Les bitumes modifiés aux polymères sont utilisés depuis plusieurs années pour réduire la gravité de la détérioration et prolonger la durée de vie utile des enrobés chauds. Pour augmenter les performances de ces liants, on fait donc appel à des techniques de modification. L'objectif de la modification est de produire un liant "idéal" qui devrait avoir une cohésivité et une adhésivité améliorées et une susceptibilité thermique très faible dans toute la plage des températures d'utilisation.

Les résistances à la déformation permanente, à la rupture et à la fatigue devraient être fortes, alors que la susceptibilité aux temps de charge devrait être faible. À cet effet, les chercheurs se sont fixés comme objectif de trouver des additifs plus performants, moins coûteux et faciles à incorporer dans des matrices bitumineuses. [101]

### **7.2 Historiques**

Le développement significatif des liants modifiés ou comportant des additifs, avec des processus industrialisés et maîtrisés, peut être situé dans les années 70. En Europe, et particulièrement en Allemagne, des applications d'enrobés au bitume polymère voient le jour au début des années 70. Le développement de bitumes modifiés par des polymères et de l'emploi d'additifs est intimement lié à la mise au point de nouvelles formules d'enrobés bitumineux de couches de surface en faible épaisseur, offrant de meilleures performances en terme de qualité d'usage et de durabilité. C'est tout un ensemble de techniques de chaussée qui s'industrialisera dans les années 80. AIPCR, C8 [112]

### **7.3 Définition des polymères**

Les matériaux polymères, appelés aussi matières plastiques ou simplement plastiques, sont des matériaux organiques composés essentiellement d'atome de carbone et d'hydrogène. Ces produits sont nés de la recherche scientifique intensive du XXe siècle notamment. Dès le milieu des années 1920, les bases scientifiques nécessaires à leur développement ultérieur étaient fondées. [111]

### **7.4 Différents types de polymères utilisés pour la modification des enrobés**

Pour qu'un polymère soit efficace, il faut qu'il soit compatible avec la matrice bitumineuse. Le polymère doit améliorer la résistance du bitume à des températures élevées sans pour autant le rendre trop visqueux à la température du malaxage ou bien trop rigide à des températures basses. Si ce bitume est appelé à être utilisé dans le mélange bitumineux, il doit être capable de se malaxer dans des équipements conventionnels. Dans tous les cas, le bitume doit être disponible, moins coûteux et stable pendant le stockage et l'application.

Les problèmes majeurs que posent les enrobés modifiés avec des polymères résident dans la mauvaise solubilité de certains polymères dans la matrice bitumineuse qui peut conduire à la séparation des phases. Les principaux groupes de polymères utilisés pour la modification des enrobés sont les suivants :

- Polymères thermoplastiques;
- Caoutchoucs naturels et synthétiques.
- Caoutchoucs thermoplastiques ;
- Polymères thermodurcissables.

Actuellement, les enrobés sont modifiés surtout avec des caoutchoucs thermoplastiques, aussi bien qu'avec des polymères thermoplastiques. Les caoutchoucs naturels et synthétiques sont difficilement appliqués comme additifs, tandis que les résines thermodurcissables sont utilisées dans des applications particulièrement spéciales.

Quelques fois, deux différents polymères sont ajoutés simultanément, dans le but de conférer au enrobé modifié les performances requises. Il est important de rappeler que chaque classe de polymères est caractérisée par son poids moléculaire, sa structure, sa viscosité, etc..., et que dans chaque cas, les caractéristiques propres du polymère devraient être étudiées avant que ce dernier soit incorporé dans la matrice bitumineuse [101]

#### **7.4.1 Polymères thermoplastiques**

Les polymères thermoplastiques sont caractérisés par le ramollissement durant le chauffage et par le durcissement durant le refroidissement. Le polyéthylène (PE), le polypropylène atactique (aPP) et isotactique (iPP), le chlorure de polyvinyle (PVC), le polystyrène (PS), l'éthylène acétate de vinyle (EVA) et l'éthylène méthacrylate (EMA) sont les principaux polymères de ce groupe expérimentés comme modifiants. Le PE, l'aPP, l'EVA et l'EMA sont utilisés à l'échelle industrielle.

Les bitumes modifiés avec le polyéthylène (PE) et le polypropylène atactique (aPP) ont fait l'objet de plusieurs études et ont trouvé plusieurs applications industrielles. Mais peu d'entre elles sont des applications routières. Il a été montré que la dispersion des polymères et la stabilité du mélange obtenu croissent quand la cristallinité des polymères diminue et quand la chaîne devient plus ramifiée, en partant de la chaîne quasi-paraffinique du polyéthylène (PE) vers ses divers homologues. [101]

#### **7.4.2 Caoutchoucs naturels et synthétiques**

Les caoutchoucs naturels et synthétiques tels que le polybutadiène (PB), le polyisoprène (IR), le butyle caoutchouc, le Caoutchouc Styène Butadiène (SBC) et le polychloroprène (CR) ont tous été testés avec les bitumes. Le caoutchouc naturel est susceptible à la décomposition et à l'oxydation. Il possède un poids molaire trop élevé pour être directement dissous dans le bitume. [101]

#### **7.4.3 Caoutchoucs thermoplastiques**

Les élastomères thermoplastiques utilisés comme adjuvants pour les enrobés sont des blocs de copolymères de mono-et dioléfinés. Comme monoléfiné, le styrène est le plus utilisé, tandis que comme dioléfinés, ce sont le butadiène et l'isoprène. Ces blocs copolymères sont sous forme de SBS (ou SIS), où S représente le polystyrène et B (ou I) le polybutadiène (ou polyisoprène). Ces copolymères se distinguent par leur teneur en styrène, leur poids moléculaire et leur configuration. [101]

#### **7.4.4 Polymères thermodurcissables**

Les polymères thermodurcissables ne ramollissent pas durant le chauffage. Ils ne sont pas très utilisés dans le pavage des routes, en raison de leur coût élevé et de la méthode de leur mise en œuvre. Toutefois, les propriétés qu'ils confèrent au enrobé sont remarquables. Les produits les plus connus sont basés sur des résines époxy. Ils sont utilisés en mélange de deux composants dont l'un contient la résine et l'autre un durcissant qui réagit chimiquement pour former une structure tridimensionnelle forte. Mélangées avec du bitume en quantité substantielle, les résines époxy montrent plus les propriétés des résines thermodurcissables modifiées que celles des bitumes. Quand les deux composants (résine et durcissant) des résines thermodurcissables se mélangent. La durée de vie du liant se trouve limitée. Le bitume modifié n'exhibe pas d'écoulement visqueux; il devient très résistant aux attaques des produits chimiques, notamment des solvants et des fuels. Depuis son introduction sur le marché, le bitume époxy est utilisé pour couvrir des aires spéciales des aéroports et des ponts.

#### **7.5 Bitume polymère**

##### **7.5.1 Compatibilité des bitumes et des polymères**

En terme pratique, la compatibilité se définit comme une situation où le bitume et le polymère peut se combiner pour former un produit dont les propriétés se trouvent améliorées et où ce mélange peut être manipulé sans précautions excessives

##### **7.5.2 Comptabilité – Solubilité**

La solubilité de produits (polymères) dans les bitumes dépend de nombreux paramètres, dont les plus importants sont :

- la différence des paramètres de solubilité du polymère et de la fraction « maltènes » du bitume ;
- la quantité et le type des asphaltènes présents dans le bitume.

Les systèmes bitumes/polymères et leur tendance à la séparation se caractérisent par une température critique supérieure de solution. Pour tout mélange de bitume et de polymère, pour lequel la différence des paramètres de solubilité est assez faible pour être acceptable, il y a une température au-dessus de laquelle une seule phase existera et en-dessous de laquelle il y aura deux phases. Pour les polymères SBS, cette température est dans l'intervalle 160 à 170 °C. Pour les polymères EVA, elle est beaucoup plus élevée et l'on ne peut pas obtenir de système uniphasique à une température acceptable. La valeur de cette température critique dépend, elle aussi, de nombreux paramètres, mais pour les bitumes, elle est principalement déterminée par les asphaltènes et dans une moindre mesure, par le pouvoir de solvation des maltènes. Ainsi, il n'existe pas en soi de bitume compatible ou incompatible, tant que le mélange n'est pas défini plus précisément en termes de nature, de concentration et de température à laquelle une seule phase devrait exister. (Tableau 7.1)

Tableau 7.1 Paramètres de solubilité pour différents polymères

Polymères	Paramètres de solubilité	
	Volume dependent $d_V$ (J/cm <sup>3</sup> ) <sup>0,5</sup>	résiduel $d_V$ (J/cm <sup>3</sup> ) <sup>0,5</sup>
SBR	17,65	6,79
Caoutchouc naturel 1	17,69	3,11
SBR 5630	17,93	2,7
Poly isobutylène	18,2	0
PMMA 2	18,69	7,79
Nylon 6,6	19,2	12,31
Caoutchouc naturel 2	19,41	0
Polystyrène 3	19,47	2,11
Chloroprène	19,65	2,7
Polystyrène	20,36	4,19
PVC 1	20,5	7,65
Acrylonitrile -Butadiène	20,57	4,19
PMMA 1	21,37	8,06
Polystyrène 2	21,37	0
PVAc	22,67	8,91
PVC 2	22,7	7,4

### 7.5.3 Compatibilité – Convenance

Qualifier d'incompatible un bitume qui ne conduirait pas à un mélange à une seule phase impliquerait trop rapidement que ces bitumes ne sont pas adaptés pour être modifiés par des polymères. L'appréciation de compatibilité est pour partie attachée aux performances du produit, mais principalement à des problèmes pratiques. En général, particulièrement aux basses températures, les mélanges de bitume et d'élastomères du type SBS ou de plastomères du type copolymère d'éthylène sont, à l'échelle de la microstructure, des systèmes à deux phases composés :

- d'une phase riche en polymère qui contient le polymère et une partie des maltènes du bitume absorbée par le polymère ;
- d'une phase riche en asphaltènes contenant tous les constituants du bitume qui n'ont pas été absorbés par le polymère.

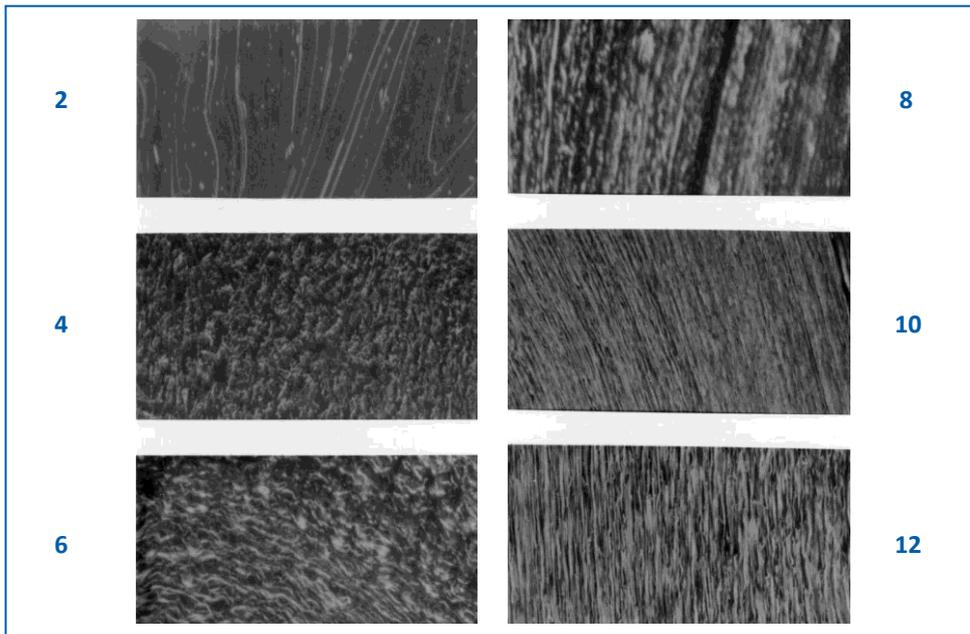


Figure 7.1 Mélanges bitume/SBS à teneur croissante de polymère

#### **7.5.4 Les liants modifiés**

Suivant la définition retenue, les liants modifiés sont des liants bitumineux dont les propriétés ont été modifiées par emploi d'un agent chimique qui, introduit dans le bitume de base, en modifie la structure chimique et/ou les propriétés physiques et mécaniques. Il s'agit de liants préfabriqués soit dans une usine distante du lieu d'utilisation, soit immédiatement avant l'emploi par une unité mobile spécialisée.

Les polymères constituent la famille d'agents modifiants chimiques la plus utilisée pour la modification des bitumes. Ils se présentent sous la forme de macromolécules caractérisées par la répétition, un très grand nombre de fois, du même groupe d'atomes, motif constitutif formé d'un ou de plusieurs monomères.

On classe les polymères en deux grandes catégories. [112]

**Les polymères thermodurcissables** qui durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique. L'enchaînement de leurs molécules forme un réseau tridimensionnel qui s'oppose à toute mobilité thermique. Ils sont relativement peu utilisés en association avec le bitume en technique routière et ne sont pas considérés dans ce rapport. On citera simplement les applications dans la réalisation d'enduits superficiels aux propriétés fortement antidérapantes, à partir de résines epoxydes et de granulats très durs

**Les polymères thermoplastiques** qui se fluidifient et deviennent malléables sous l'effet de la chaleur, de façon réversible. Ils sont formés, en première approximation, de chaînes macromoléculaires linéaires, éventuellement ramifiées. Ils sont combinés au bitume à température élevée, alors que le mélange se présente sous une forme fluide plus ou moins visqueuse.

La modification du bitume peut être obtenue avec d'autres agents modifiants que les polymères de synthèse, il s'agit notamment de la poudrette de caoutchouc et des latex qui sont examinés dans le rapport.

Le tableau ci-après dresse une liste des principaux agents modifiants du bitume employés en technique routière classés par catégorie.

Tableau 7.2 Principaux agents chimiques utilisés dans la modification des bitumes

<b>Principaux agents chimiques utilisés dans la modification des bitumes</b>	
<b>Polymères thermoplastiques élastomères</b>	Copolymère styrène-butadiène-styrène
	Copolymère styrène-isoprène-styrène
	Styrène-butadiène
	Copolymère statistique styrène-butadiène
<b>Polymères thermoplastiques plastomères</b>	Copolymère éthylène-acétate de vinyle
	Copolymère éthylène-acrylate de méthyle
	Copolymère éthylène-acrylate de butyle
	Polyisobutylène
<b>Latex / Latex</b>	Polychloroprène
	Caoutchouc SBR
	Caoutchouc naturel
<b>Poudrette de caoutchouc</b>	

#### 7.5.4.1 Les liants modifiés élastomères

A modification des bitumes par des élastomères conduits à des liants appelés bitumes élastomères. Généralement, le bitume élastomère est obtenu par simple mélange physique mais il peut être également réticulé.

Tant pour les mélanges physiques que pour les réticulés, différents types d'homopolymères ou de copolymères peuvent être employés. Les plus courants dans le domaine routier appartiennent aux familles des copolymères styrène-butadiène. Il s'agit des copolymères statistiques (SBR), des copolymères di ou tri blocs (SB ou SBS), ces derniers pouvant être linéaires ou radiaux et éventuellement partiellement hydrogénés (SEBS).

On trouve aussi parfois les copolymères styrène isoprène (SIS), les terpolymères d'éthylène - propylène et de monomère diène (éthylidène norbornène) (EPDM) ainsi que les polychloroprènes et les SBS carboxylés.

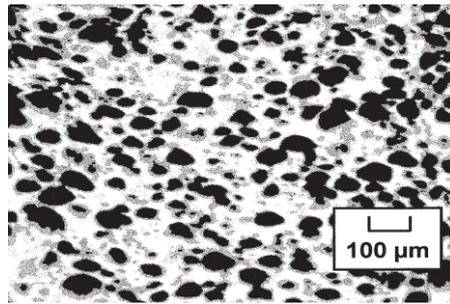


Figure 7.2 : photo de microscopie d'un mélange bitume modifié élastomères

#### **7.4.5.2 Les liants modifiés plastomères**

A modification des bitumes par des plastomères peut faire appel à différents types d'homopolymères ou de copolymères. Dans le domaine routier on rencontre essentiellement des copolymères d'éthylène : EVA (copolymères d'éthylène et d'acétate de vinyle), EMA (copolymères d'éthylène et d'acrylate de méthyle) ou EBA (copolymères d'éthylène et d'acrylate de butyle).

Les copolymères d'éthylène et d'acétate de vinyle peuvent éventuellement être utilisés associés à des SBS et/ou à des polyisobutylènes (PIB).

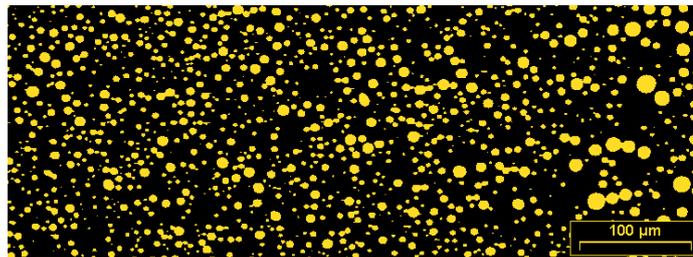


Figure 7.3 : Microstructure d'un bitume plastomère à matrice bitume continue

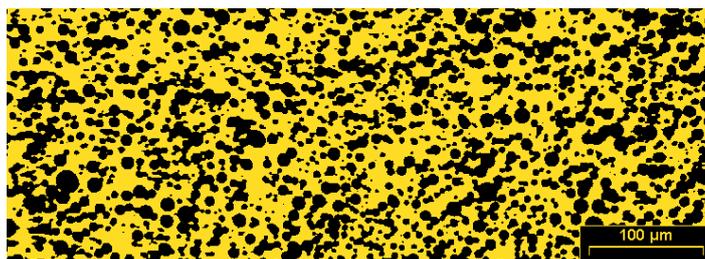


Figure 7.4 : Microstructure d'un bitume plastomère à matrice polymère continue



Figure 7.5 : Microstructure d'un bitume plastomère à matrice mixte

### **7.5.4.3 Modification des bitumes par d'autres polymères et des mélanges d'élastomères et de plastomères**

#### ▪ **Terpolymères**

En complément des copolymères, des terpolymères ont été mis au point pour la modification des bitumes comme le composé d'une chaîne éthylénique avec des groupements fonctionnels d'acrylate de butyle et de glycidyl acrylate de méthyle.

Le cycle époxyde de la structure glycidique est supposé réagir chimiquement avec le groupement d'acide carboxylique des molécules de bitume. Cette liaison assure une bonne stabilité au mélange bitume polymère. [102]

#### ▪ **Les bitumes-caoutchouc**

Le caoutchouc naturel ou synthétique a été utilisé comme agent de modification des bitumes depuis les années 60 aux États-Unis par opposition à l'addition de caoutchouc comme partie de la fraction granulaire, est défini par la norme ASTM D 6114. Le caoutchouc provient en général de pneumatiques usagés réduits à l'état de poudrette de taille au plus millimétrique. Introduit dans le bitume chaud, le caoutchouc réagit et gonfle par absorption de fractions aromatiques du bitume. La vulcanisation du caoutchouc issu du recyclage des pneumatiques fait que les polymères formant la poudrette ne se dissolvent pas bien dans le bitume chaud et que le mélange est généralement instable. De nombreux procédés de fabrication, protégés par des brevets, ont été imaginés pour obtenir un liant modifié. [112]

## **7.6 Conclusion**

L'utilisation et l'amélioration des performances du bitume font donc l'objet de nombreuses recherches. Les expériences internationales et nationales ont montré que l'amélioration des propriétés mécaniques de l'enrobé peut se faire soit par adjonction du polymère ou l'un de ses dérivés au liant lors de la modification (procédé humide), soit par les ajouts au mélange hydrocarboné lors de l'opération de malaxage (procédé sec).

L'utilisation de plastique en PEHD en béton bitumineux peut améliorer un certain caractéristiques, la variation des pourcentages de substitution au bitume nous aidera à avoir le pourcentage adéquat qui améliore les deux caractéristiques, la stabilité Marshall ainsi que la résistance au fluage, et nous assure que l'ajout directement des faibles pourcentages au mélange bitumineux sans substitution au bitume va certainement donner des améliorations. La poudrette de caoutchouc, c'est un matériau compatible avec le bitume, il est élastique à température ambiante et présente une faible viscosité aux températures d'enrobage et de mise en œuvre des bétons bitumineux.

D'après la recherche théorique que nous avons faite, on peut dire que l'amélioration des caractéristiques du béton bitumineux par les polymères a les avantages suivants :

***Chapitre 7 : Etude théorique de l'amélioration des caractéristiques du masque en béton bitumineux par les polymères***

---

- Meilleure résistance à la déformation permanente ;
- Résistance à la traction et module élastique considérablement améliorés.
- Sensibilité à la température améliorée.
- Excellente résistance à la fatigue.
- Très bonne résistance à la propagation de fissures.
- Excellente adhérence de granulats ;
- Prolonge la durée de vie utile ;
- Aucune condition de manipulation et de stockage spéciaux. ;

# **Conclusion Générale & Recommandations**

## **Conclusion générale**

Ce travail a été entrepris dans le but d'améliorer l'étanchéité des barrages en remblai, par le bon choix de l'organe d'étanchéité l'amélioration de caractéristique de celui-ci par l'augmentation de la stabilité, la durée de vie et la diminution du fluage sur le talus.

Cette recherche commence par un aperçu sur le bitume et le béton bitumineux et leur participation dans le domaine hydraulique, on donne ensuite une recherche sur le meilleur organe d'étanchéité, cette étude montre que le masque en béton bitumineux est certainement la solution la plus facile à réaliser et la plus économique qui puisse être conçue pour l'étanchement parfait des barrages en remblai. Après, on a donné une aperçue sur l'avantage et l'inconvénient d'un masque réaliser en béton bitumineux et l'expérience algérienne dans ce contexte. Le problème majeur de tel type de masque est la température sur la surface due au rayonnement solaire, il était indispensable de le recouvrir d'une protection thermique. Cette solution, sans doute parfaite, avait l'inconvénient d'être fort coûteuse.

Pour éviter l'emplacement de deux couches, la couche du masque et la couche de protection thermique et minimiser le coût total de l'ouvrage, on a fait une étude détaillée sur la stabilité du masque tout seul sans la couche de protection, On a prenez barrage Bouhnifia comme axe d'étude, pour ce faire, on a préparé et confectionné des éprouvettes dans le laboratoire et appliqué des essais préliminaires pour le choix les éprouvettes qui vérifie les normes, Ensuite, on a appliqué un essai de stabilité sur le talus où des éprouvettes ont été placé dans une étuve et maintenez pendant 48 heures sous une température de 70 c°.

D'après les essais que nous avons menés et les résultats obtenus, nous pouvons dire que le masque en béton bitumineux du barrage Bouhanifia résiste tout seul à une température de 70 °C malgré l'absence de la protection thermique.

La deuxième partie de cette recherche a pour but d'améliorer le béton bitumineux par le filler, les résultats montrent que des quantités convenables de filler baisser le volume des vides, rends le mélange plus dense et imperméable. Par contre, des quantités excessives de filler accroîtront notablement la demande en bitume en raison de la surface spécifique accrue, diminuer le fluage et augmenter les pourcentages d'imbibition et du gonflement.

La troisième partie de cette recherche donne une étude théorique sur l'amélioration des caractéristiques du béton bitumineux par les polymères, et qui montre les avantages de l'ajoute de polymère dans le bitume bitumineux.

Le travail effectué n'est qu'une modeste contribution pour améliorer l'étanchéité des barrages en remblai, néanmoins, ce sujet peut faire l'objet d'étude plus approfondis, notamment l'amélioration de béton bitumineux par les polymères et par le changement du pourcentage du liant dans le mélange.

## **Recommandations**

L'étude faite dans le présent travail montre que l'utilisation des masques en béton bitumineux comme organe d'étanchéité est une technique parfaitement maîtrisée et qui a donné de façon générale d'excellents résultats pour des coûts de travaux compétitifs par rapport aux solutions concurrentes, on donne les recommandations suivantes. :

- ✓ Dans les prochains ouvrages l'élimination totale de la deuxième couche de protection.
- ✓ Le bon choix des matériaux et le bon pourcentage de filler qui nous donne un meilleur mélange pour un masque en béton bitumineux.
- ✓ Faire des études profondes sur les enrobés bitumineux par plus des essais, par le changement de pourcentage de liant dans le mélange bitumineux, et en autre temps le changement des deux pourcentages le liant et le filler, pour bien comprendre l'influence de ces deux matériaux sur le comportement de béton bitumineux et pour participer à l'amélioration des caractéristiques du masque par l'augmentation de leur résistance sur le talus et la diminution de leur fluage ainsi de l'augmentation de leur durée de vie.
- ✓ Faire une étude détaillée pour l'amélioration des caractéristiques du masque par les polymères.
- ✓ Les promotions qui viennent de faire le même travail pour les autres barrages Ighil-enda et Sarno.

# **Annexes**

▪ **Protection des cotes :**

- Ouvrage côtiers le long des cotes Est Sud de Angleterre 1942.
- Protection contre la mer à l'il Canvey, Essex, Angleterre.
- Protection contre la mer sur les l'île de la mer du nord. Allemagne.

▪ **Digues et berges des rivières :**

- Digue de pette Sussex, Angleterre 1952.
- Protection de la digue du Tage, Portugal 1937.
- Protection de la digue du Conge (ex Belge), 1938.
- Protection de la digue du Mississpi, États-Unis. 1933.
- Protection de la digue de la seine. 1953.

▪ **Canaux de navigation :**

- Protection du barrage du canal de Suez, 1952.
- Revêtement du canal Juliana-Hollande, 1934.
- Revêtement du canal Dortemund Allemagne, 1935.
- Revêtement du canal Nimy Balton , Belgique, 1939.
- Protection des berges du canal du centre, France, 1949.
- Protection des berges du canal amesterdam, Hollande, 1950.

▪ **Réservoirs et barrages ;**

- L'étanchement du barrage, Allemagne 1927 assuré par un noyau incliné anglaise avec des palplanches pied.
- L'étanchement du barrage Ghrib, Algérie, 1937.
- L'étanchement du barrage, Bounanifia, Algérie, 1937.
- Protection du barrage Magos, Portugal, 1936.
- Étanchement du barrage de Val Do Gairo, Portugal, 1948.
- Étanchement du réservoir de l'ouest des Etats Unis, 1924.
- Étanchement des réservoirs de Kalgoorlie, Australie occidentale, 1950.
- Parafouille du barrage Clayotor, Etat Unis 1938.

▪ **Canaux d'irrigation et de drainage ;**

- Revêtement du canal d'irrigation de Magos, Portugal, 1936.
- Revêtement du canal Rabenstein, Allemagne, 1936.
- Revêtement des canaux d'irrigation, État Unis.
- Revêtement en enrobés à chaud du bitume du canal des Beni-Amir Maroc 1948.

▪ **Jetées, brise-lames, épis et travaux portuaires ;**

- Étanchéité du sous-sol au barrage de Hales-Bar-Guild, Tennessee, État Unis, 1920.
- Etanchéité d'une barrière souterraine au réservoir de Great Falls, Tennessee, État Unis, 1925.

L'un des plus intéressants de ces vestiges des anciens temps est l'endiguement à assuré sur le tigre par le roi Adad Nirarit, il y a plus de trois mille ans. [1]

▪ **Masque d'étanchéité du barrage de la Fedaiia ITALIE**

La Fedaiia est une petite vallée, collecte les eaux de fonte d'un glacier qui le surplomb l'idée est l'utilisation des eaux froides pour constituer un réservoir enfermant par des barrages les deux extrémités de la vallée.

La vallée est fermée par un second barrage constitué par une digue de sable et gravier fortement compactes d'une hauteur maximale de 18m et telle formation est extrêmement perméable. Le parement amont de cette dernière de pente 1/2 a été posé en deux couches et à titre de protection le revêtement bitumineux a été recouvert par une couche de 12 cm de béton de ciment armé d'être protégés contre les glaces.

▪ **Réservoir près de serravalle scivia-Alessandria. Italie.**

C'est une retenue collinaire d'une capacité de 120 000 m<sup>3</sup> d'eau destinée à l'irrigation en 1961 ont été dotées d'un revêtement bitumineux de protection ou d'étanchéité en même temps un revêtement poreux de 5500 m<sup>2</sup> et un revêtement étanche de 3500 m<sup>2</sup> et une membrane bitumineuse.

▪ **Masque d'étanchéité du barrage de Genketal. Allemagne**

Ce barrage a été construit pour augmenter l'approvisionnement en eau potable d'une zone industrielle le lac fermé dans la vallée a une superficie de 75 ha et une capacité de près de 10 millions de m<sup>3</sup>

La digue est réalisée en enrochement dotée d'un masque bitumineux étanche de 35 cm en deux couches de 6 et 9 cm d'épaisseur séparées par une couche de 12 cm de pierres pré-enrobées à diriger les eaux filtrant au travers de la couche de surface vers des drains tubulaires espacés de 5 à 6 m et aboutissant à des niches de la galerie d'inspection.

La composition du béton bitumineux est 80 % de granulats 18 % de filler et 8.1 % de liant bitumineux construit en 1952.

▪ **Ecran d'étanchéité du barrage Hennetal. Allemagne**

Un barrage en enrochement de 59 m de hauteur et de 326 m de longueur au couronnement, ce barrage comporte sur le parement amont un masque d'étanchéité bitumineux construit en 1955, en deux couches de béton bitumineux étanche avec couche drainante intermédiaire en enrobé ouvert, le rôle de cet écran bitumineux est d'empêcher une filtration excessive au travers du barrage, le béton bitumineux était constitué par un mélange d'agrégats à éléments fins et de 8 à 8.4 % de liant bitumineux.

▪ **Masque d'étanchéité du barrage Perlenbach, Allemagne**

Ce barrage a été construit en 1953-1954 avec masque étanchéité bitumineux amont couche de liaison de 6 cm mise en place en deux couches et une couche de surface de 7 cm de béton bitumineux

▪ **Bassin de compensation de Viade-Luxembourg**

Revêtement bitumineux d'un bassin de compensation a Schuanzacht veit-autrich :

▪ **Réservoirs et Barrage**

Le réservoir de Shotton- Grand Bretagne est construit en 1953 avec un revêtement imperméable en enrobés à chaud, ce réservoir est toujours en excellent état et n'a donné lieu à aucune dépense d'entretien.

Le revêtement bitumineux à été constitué par une couche de base de 5 cm après compactage (composée de 55 % d'agrégats calcaires, conçue pour avoir le maximum de résistance et de compacité) cette couche recouverte d'une couche de mico-bitumineux de 2.5 cm d'épaisseur avec une teneur en bitume de 12.5% et de 16 à 18 % de filler.

▪ **Etang KeuKenhof- Pays Bas**

Réaliser en 1954 à été imperméabilisé au moyen d'une membrane bitumineux enterrée le fond et les bords d'un étang d'une superficie totale de 600 m<sup>2</sup>, et une pente des bords variant entre 1/1.5 et 1/2.5, la membrane bitumineux enterrée à été réalisé à raison de 9 kg/m<sup>2</sup> de bitume soufflé R85/40, des échantillons prélevés et restés sous l'eau trois mois par ans pendant 8 ans, bien que le comportement de cette membrane bitumineux soit entièrement satisfaisante.(Asbek )

▪ **Revêtement de digue de l'étang de grand rue Loiret France**

Constitue un réservoir d'une superficie d'environ 100 ha, contenant 5 millions de mètre cube d'eau, construit en 1645, cet étang est partiellement entouré d'une digue d'argile.

Pour imperméabiliser les surfaces du sol ainsi découvertes un revêtement bitumineux a été posé sur le fond et sur les parois latérales, à l'exception d'une fraction du talus nord, constitué par des roches tendres, ce dernier talus à été recouvert en partie d'un parement de béton projet légèrement armé de 10 cm, mise en place au moyen d'appareils de projection à air comprimé, et scellé en partie par des dalles de béton de ciment de 25 cm jointoyées au bitume.

Le revêtement bitumineux imperméable a été posé en quatre couches, la couche de fond d'une épaisseur de 6 cm n'avait pas d'autre but que l'égaliser la surface pour recevoir les deux couches de béton bitumineux de 6 cm chacune, posées à joints alternés. La quatrième couche a été consisté par un enduit de scellement de mastic bitumineux de 5 à 6 mm d'épaisseur.

▪ **Bassin de compensation de Rasswiese, Kolbnitz, Autriche**

Construit de 1957 à 1959 d'une partie en déblai et partie en remblai, cette dernière à été entourée d'une digue de moraine, avec talus de pente 1/1.75, le revêtement bitumineux de cette digue est constitué par une couche de liaison de 6 cm d'épaisseur à base de bitume 80/100 et par une couche de 200 kg/m<sup>2</sup> en deux épaisseur de béton bitumineux étanche.

▪ **Ecran d'étanchéité du barrage du Rotguldenseses, Autriche**

Le type d'écran bitumineux envisagé avait une pente 1/1, une épaisseur de 1.20m et consistait en un squelette de bloc de pierre dont les vides seraient remplis par un béton bitumineux coulé. Cet écran devait être construit par couches successives d'environ 60 cm d'épaisseur d'un mélange de béton bitumineux et de pierres de 10 à 40 cm.

▪ **Imperméabilisation de bassin de compensation en Suisse**

Le revêtement imperméable est constitué par deux couches de béton bitumineux étanche, le bitume 80/100 à adopté par ce qu'il le mieux convenir aux températures habituelles de la suisse, le dosage en bitume qui dépend de la composition granulométrique des agrégats, varie entre 7.8 et 9% en poids des agrégats secs.

▪ **Revêtement bitumineux divers de bassin californiens Etat unis d'Amérique**

Les états unis depuis plus de 35 ans, utilise en Californie le bitume sous diverses formes : béton bitumineux, membranes bitumineux enterrées, chapes bitumineuses préfabriquées pour la construction de revêtement de bassin.

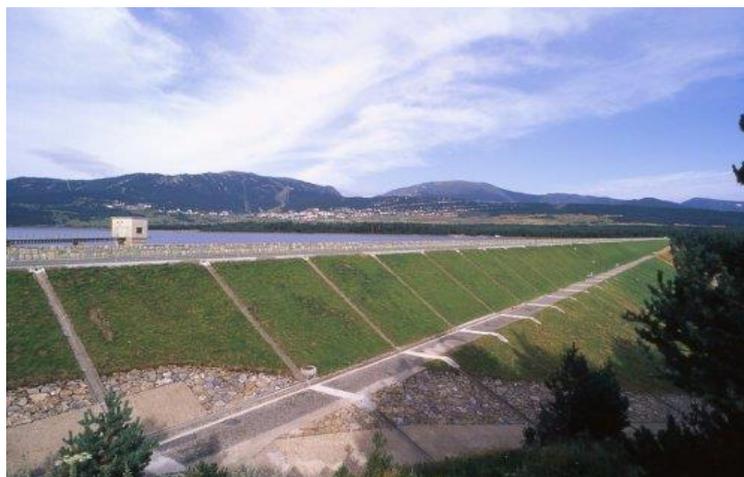
Comme les bassins construits au cours des années 20 assurent toujours un service satisfaisant, il est intéressant de noter certains particularités des constructions modernes, basés sur l'expérience à qui se dans ce domaine.

Le revêtement imperméable en béton bitumineux riche en bitume doit naturellement être capables de résister sur les berges latérales des bassins, au fluage plastique sous l'action de leur propre poids en particulier quand le bassin est vide.

▪ **Masque bitumineux du barrage Montgomery dans les montagnes Rocheuses, Colorado**

Réalisé en enrochement entre 1955 et 1957 pour la ville de Colorado pour assuré l'alimentation en eau de la ville, leur étanchéité est assuré par un masque en béton bitumineux exécuté en trois couche et d'une épaisseur totale de 17.5 cm, une minutieuse observation de ce masque au cours d'une période comprenant deux rives successifs n'a permis de constater ni détérioration ni variation des dimension ni mouvement de joints.

Bien que ce masque en béton bitumineux contenant 8.8% de bitume se soit comporte de manière satisfaisante sur le talus de pente 1/1.5, la pente du parement de l'ouvrage a été finalement



**Figure A2.1 : Barrage de Matemale**



**Figure A2.2 : Barrage de Grand'Maison (France)**



**Figure A2.3 :** Barrages de Gréziolles



**Figure A2.4 :** Barrage de Monnes



**Photo 1**  
Vue générale  
du barrage.  
Etanchéité amont  
en cours de pose  
*General view  
of the dam. Upstream  
waterproofing  
during placement*



**Photo 2**  
Soudage des lés  
(de gauche à droite :  
la géomembrane,  
le géotextile,  
la couche support)  
*Welding of strips  
(from left to right :  
the geomembrane,  
the geotextile,  
the support layer)*

**Figure A2.5 :** Barrage de l'Ortolo (Haute Corse)

# **Références Bibliographiques**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Alonso. E, Poulain. D, Bernede. T** (1994). Influence des caractéristiques mécaniques et des pressions interstitielles sur la stabilité des barrages en terre homogènes. Journées nationales d'étude, AFEID-CFGB, CEMAGREF, pp 239 - 256.
- [2] **Alonso. E, Becue .J. P, Bolle. G, Brodin. J.L, Brunel. P, Cassard. A, Degoutte. G, Dore. M, Lautrin. D, Lafevre .J, Michel .G, Royet .P et Tratapel .G** (2002). Barrages en remblai : Petits barrages et recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. CEMAGREF ED, pp 67-111.
- [3] **Alonso .E** (2009). Barrages en remblai. Chapitre IV, CEMAGREF.
- [4] **Armelle. L** (2010). Détection de fuite dans les barrages en remblai par la méthode de polarisation spontanée et par tomographie électrique : cas de la jonction de deux barrages en remblai. université de Montréal.
- [5] **Asbek. WFV** (1969). Le bitume dans les travaux hydrauliques. Vol II, Dunod, Paris.
- [6] **Barakat. B** (1991). Instabilité aux écoulements des milieux granulaires, aspects morphologiques et probabilistes. *Thèse Ecole Centrale de Paris*, 135p.
- [7] **Baron. J, Ollivier. JP**. Les bétons : bases et données pour leur formulation, École française du béton, association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Édition, Eyrolles.
- [8] **Barth. E.J** (1962). Gordon and Breach, Asphalt science and technology. New York, pp 109 - 399.
- [9] **Belbachir. K, Montel. B, Chervier. L** (1973). Comportement des masques d'étanchéité en béton bitumineux des barrages du Secrétariat d'État à l'Hydraulique Algérien. *XI<sup>ème</sup>, ICOLD, Madrid, Q.42, R.51, pp 891-922.*
- [10] **Bonelli. S** (2001). Ouvrages hydrauliques en remblai : un regard transversal sur l'action de l'eau. *Revue Ingénieries N° 26, pp 49-58.*
- [11] **Bouvard. M** (1984). Les barrages mobiles et ouvrages de dérivation. Edition, Eyrolles, 359 p.
- [12] **Brousek. N** (1973). La protection des parements des barrages en terre et en enrochement. *XI<sup>ème</sup> ICOLD, Madrid, Q.42, R.23, pp 396-404.*
- [13] **Brûlé. B, Ramond. G, Such. C** (1987). Relations composition-structure-propriétés des bitumes routiers. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 148, pp 69-73.*
- [14] **BTS bâtiment. BTS travaux publique**. Granulat, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. DUTGC, MSTGC, École d'ingénieurs, 2<sup>ème</sup> édition CASTILLA, Paris.
- [15] **Buron. A, Meilhac. A** (1995). Cours : Les Barrage. Lycée Pierre Caraminot, Égletons.

- [16] **Calgary. A** (2006). Comportement des barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment, fondés sur des alluvions granulaires, Congrès général annuel de la société canadienne de génie civil, Canada.
- [17] **CFBR** (2012). Technologie des barrages. Comité français des barrages et réservoirs Cedex, Paris.
- [18] **CFBR** (2013). L'histoire des barrages, comité français des barrages et réservoirs Le Bourget-Du-Lac Cedex, Paris.
- [19] **CFGB** (1973). Noyau d'étanchéité interne. *XI<sup>ème</sup> ICOLD, Madrid, Q.42, R.28, PP 477-499.*
- [20] **CFGB** (1973). L'expérience française des masques amont en béton bitumineux. *XI<sup>ème</sup> ICOLD Madrid, Q.42, R.7, pp 101-124.*
- [21] **CFGB** (1986). Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes, 47 p.
- [22] **CFGB** (1993). Petits barrages, Bordeaux, édition CEMAGREF, pp 239 – 250.
- [23] **CFGB** (1993). Barrages en remblai : protection du talus amont, bulletin 91, 121p.
- [24] **CFGB** (1995). Barrages en remblai : filtres et drains granulaires, bulletin 95, 256p.
- [25] **Champion. L** (1999). Étude des comportements rhéologique et mécanique de liants routiers purs ou modifiés par un polymère. *Thèse d'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 274 p.*
- [26] **Chiblak M** (1989). Essais sur la stabilité du bitume dans des conditions chaudes. *Thèse de Doctorat, Université Technique Dryden, Allemagne.*
- [27] **Chighanne F** (2010). Prévion de l'hydrogramme de rupture par submersion d'un barrage en enrochement avec masque amont de béton. *Ecole polytechnique, montérial.*
- [28] **CIGB**. Le barrage de Bou-Hanifia. Notice présentée par les entreprises Léon chagnaud et S.E.C, édité par la diffusion du livre, Alger.
- [29] **CIGB** (1981). Raccordement du masque amont avec la fondation et les rives. *Bulletin n° 39 ICOLD, Paris.*
- [30] **CIGB** (1982). Masque amont en béton bitumineux pour barrages en terre et en enrochement. *Bulletin n°32 a, ICOLD, Paris.*
- [31] **CIGB** (1986). Calcul statique des barrages en remblai. *Bulletin n°53, ICOLD, Paris.*
- [32] **CIGB** (1991). Étanchéité des barrages par géomembranes : techniques actuelles. *Bulletin n° 78, ICOLD, Paris.*
- [33] **CIGB** (1992). Choix de la crue de projet. *Bulletin n° 82, ICOLD, Paris.*
- [34] **CIGB** (1994). Vieillessement des barrages et des ouvrages annexes. *Bulletin n° 93, ICOLD, Paris.*
- [35] **CIGB** (1999). Noyau bitumineux pour barrages en remblai. *Bulletin n° 84, ICOLD Paris.*

- [36] **CIGB** (1999). Barrages en remblai avec masque en béton bitumineux. *Bulletin n° 114, ICOLD, pp 13-91, Paris.*
- [37] **CIGB** (1993). Barrages en remblai : protection du talus amont. *Bulletin 91, 121 p.*
- [38] **CIGB** (1995). Barrages en remblai : filtres et drains granulaires. *Bulletin 95, 256 p.*
- [39] **CIGB** (1991). Étanchéité des barrages par géomembranes : technique actuelle. *Bulletin 78.*
- [40] **CIGB** (2010). Barrages en enrochement avec masque amont en béton : concepts utiles à leur conception et à leur construction. *Bulletin n°141, ICOLD, Paris.*
- [41] **Cisse. M, Toure. A** (2003). Contribution à la mise en œuvre d'une formulation optimale de béton bitumineux : Application aux concassés de basalte de Diack. Projet de fin d'études, *Université cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.*
- [42] **Corbett. L.W** (1969). Composition of asphalt based on generic fractionation, using solvent deasphalting, elution adsorption chromatography, and densimetric characterization. *Anal, Chem, 41, 576-579.*
- [43] **CUNAT. P** (2012). Détection et évaluation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par analyse de températures réparties, mesurées par fibre optique. *Thèse de Doctorat, université de Grenoble, France.*
- [44] **Curt. C, Boissier D** (2007). Caractérisation des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux recyclés. CEMAGREF, Unité Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie Provence, France.
- [45] **Daniel. H** (1984). L'eau et le sol. Edition Cabay ,288 p.
- [46] **Degoute. G** (1997). Recommandations pour la Conception, la réalisation et le Suivi des petits barrages. Édition CEMAGREF -Engref, 175 P.
- [47] **Degoute. G** (1997). Petits barrages. Edition, CEMAGREF – Engref 184 p.
- [48] **Djemili. L** (2006). Critères de choix de projet des barrages en terre : étanchéité par le masque en béton bitumineux. *Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie.*
- [49] **Djemili. L, Chiblak. M** (2007). Study of the temperature distribution in the bituminous concrete facing used in fill dams in the semi arid region of west Algeria. *Courrier du savoir scientifique et technique, Revue périodique de l'université M. Khider Biskra, Algérie.*
- [50] **Durant. J** (1996). Petits barrages pour l'équipement rural en Afrique.
- [51] **Durand. JM, Royet, Meriaux P** (1999). Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale. Edition, CEMAGREF ,415 p.
- [52] **Duriez. M, Arrambide. J** (1962). Nouveaux traités de matériaux de construction. Tome III : Liantes et bétons hydrocarbonés, 2<sup>ème</sup> édition, DUNOD, 1530 p, Paris.
- [53] **El Beze L** (2008). Recyclage à chaud des agrégats d'enrobes bitumineux : Identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport. *Thèse de Doctorat, Université Paul cézanne Aix-Marseille III, France.*

- [54] **François. Ch** (2010). Préviation de l'hydrogramme de rupture par submersion d'un barrage en enrochement avec masque amont de béton. Projet fin d'étude, département de génie civil, géologique et des mines, école polytechnique de Montréal.
- [55] **Ghouilem. K** (2014). Impact du fluage et de la température sur les organes de lutte contre les infiltrations dans les barrages. *Thèse de Doctorat, Université mouloud mammri Tizi-ouzou*
- [56] **Giroux. B, Rivard. P** (2007). Détection des fuites d'eau du barrage St-Timothée par polarisation Spontanée, Polytechnique Montréal, Université de Sherbrooke.
- [57] **Gérard. RT** (1973). Dispositif d'étanchéité et protection des barrages en terre et en enrochement. *XIème, ICOLD, Madrid, Q.43, R.G.R, pp 239-303.*
- [58] **Gsaeger. A** (1973). The asphalt sealing membrane of the dam of tech power plan prem. *XI<sup>ème</sup> ICOLD, Madrid, Q.42, R.16, pp 265-280.*
- [59] **Gean. M, Paul. R, Patrice. M** (1996). Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et Equatoriale. CEMAGREF, Paris.
- [60] **Haddadi. S, Laradi. N, Ghorbel. E** (2006). Fluage des bétons bitumineux : Influence de la classe du bitume et des polymères; FGC/USTHB. BP 32 El Alia 16111, Bab Ezzouar. Algérie.
- [61] **Harlin. M** (1989). Le bitume. École Nationale des Ponts et Chaussées, 128 p.
- [62] **Hoiberg. A.J** (1964). Bituminous materials: Asphalts, Tars and Pitches, New Jersey: Interscience publishers, 1, 432 p.
- [63] **Hoiberg. A.J** (1965). Bituminous materials: Asphalts, Tars and Pitches, New Jersey: Interscience publishers, 2, 698 p.
- [64] **Junghans. H** (1996). Durée du levé de soleil et réception du rayonnement solaire par des plans inclinés. Rapport scientifique, Berlin.
- [65] **Kert. C** (2008). La sécurité des barrages en question, Rapport de l'OPCEST.
- [66] **Kreitmann. M** (1959). Variation journalière de la température dans le masque en béton bitumineux. Rapport n° III du 2/9/59, Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics d'Algérie, pp2-8.
- [67] **Labioud. Z, Remini. B, Belaredj. M** (2004). Traitement de la vase du barrage Bouhnia en vue de sa valorisation. Laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface, Larhyss journal, ISSN 1112- 3680, n° 03. pp 7-12.
- [68] **Lafleur. J, Mlynarek. J, Rollin. AL** (1989). Filtration of broadly graded cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol 115, n°12, pp 1747-1768.
- [69] **Lempfeiere. F** (2002). Histoire des barrages et perspectives. *Revue la Houille Blanche*, N°4/5, pp134-137.

- [70] **Lamontagne. J.** Vieillissement des bitumes modifiés polymères à usage routier par simulations et techniques spectroscopiques. *Thèse SCI. de l'Université d'Aix-Marseille III*, 257 p.
- [71] **Ledelieu. P** (2003). Les barrages conception et Maintenance. Edition Université de Lyon 35p.
- [72] **Ledelieu. P** (2008). Grands barrages, Petits barrages. Le Comité Technique Permanent des Barrages et Ouvrages Hydrauliques Revue Risques Infos n°20, 6p.
- [73] **Lesueur. D, Planque. L.** Les propriétés rhéologiques du bitume, Les liants hydrocarbonés: des bitumes purs aux liants modifiés et bitumes spéciaux. Formation, École Nationale des Ponts et Chaussées ENPC.
- [74] **Lohr. A, Feiner. A** (1973). Asphaltic concrete cores experience and development. *XI<sup>ème</sup>, ICOLD, Madrid, Q.42, R.47, pp 834-849.*
- [75] **Lombardi. B** (1992). Le pétrole brut et l'industrie du raffinage, les bitumes, les rendez vous du Laboratoire. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Aix en Provence.
- [76] **Mailloux. A, Chénard. J** (2011). Les essais qualitatifs réalisés sur les enrobés et leurs constituants; Formation sur la gestion de la qualité en chaussées souples. Québec .
- [77] **Manojlovic. J, Herment. R** (1992). Perrés au mastic bitumineux pour les digues submersibles. Revue générale des routes et des aérodromes, pp. 2 -7.
- [78] **Mallet. C, Pacquant. J** (1951). Les barrages en terre. La Houille Blanche édition, 345 p, Grenoble.
- [79] **Mallouk. JG** (2012). Les enrobés bitumineux. Tome 1, Modulo Editeur, 181 p.
- [80] **Mariama. C** (2003). Contribution à la mise en œuvre d'une formulation optimale de béton bitumineux : application aux concassés de basalte de Diack, mémoire fin d'étude, département de génie civil, école supérieur polytechnique, université cheikh Anta Diop de Dakar- Sénégal.
- [81] **Martin, Drouhin** (1936). Congrès des grands barrages. Washington, Question VI.
- [82] **Massiera. M, Vautour. J, Coulibaly. Y, Hammamji. Y, Chrzanowski. AS** (2006). Comportement des barrages en enrochement avec masque amont en béton de ciment fondés sur des alluvions granulaire, congrès général annuel de la société canadienne de génie civil, Calgary Alberta, canada. [CCGE].
- [83] **Mériaux. P, Royet. P, Folton. C** (2004). Surveil lance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations. CEMAGREF, éditions, 199 p.
- [84] **Messaïd. B** (2009). Étude de la position effaçasse des drains dans les barrages en terre. *Thèse de Doctorat, Université Colonel Hadj-Lakhdar- Batna, Algérie.*
- [85] Michalski E R, Clerdouet D (1988). La sécurité des petits barrages : analyse des risques potentiels, proposition de mesures techniques préventives. Ministère de l'environnement, bureau de recherches géologiques et minières, France.

## Références bibliographiques

---

- [86] **Ministère de l'Agriculture** (1989). Technique des barrages en aménagement rurale. Nouvelle édition, Paris.
- [87] **Ninouh. T**, Caractérisation des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux recyclés. Projet de Fin d'Études, Département de Génie Civil, Université de Tébessa, Algérie.
- [88] **Norme française (NF EN 12593)** (1999). Bitumes et liants bitumineux, détermination du point de fragilité Fraass.
- [89] **Norme française (NF EN 1426)** (1999). Bitumes et liants bitumineux, Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille.
- [90] **Norme française (NF)**. Béton et constituants du béton. Tome 2, Collection complète 3<sup>ème</sup> édition, ISBN 2-12-131 832-3.
- [91] **Norme française (NF EN 1427)** (2000) .Bitumes et liants bitumineux, Détermination de la température de ramollissement, Méthode Bille et Anneau.
- [92] **Norme française (NF EN 12591)** ( 1999). Bitumes et liants bitumineux - Spécifications des bitumes routiers.
- [93] **Norme française (NF EN 13108-8)** (2006) Agrégats d'enrobés. Mélanges bitumineux: Spécifications de matériaux.
- [94] **Paradis. M** (2008). Les enrobés du MTQ : relation entre leurs caractéristiques, leur mise en œuvre et leur performance sur la route. Colloque Bitume Québec La mise en œuvre des enrobés bitumineux – Boucherville.
- [95] **Patrick. B, Riesterer. J.M** (2005). Retour d'expérience d'un grand chantier d'écran mince au canal de dérivation EDF de Strasbourg. Ingénierie N° spécial, p 139-150
- [96] **Pezold. K** (1986). Bases de la construction dans les régions chaudes. I.A.W, Bauwesser, Leipzig.
- [97] **Philipponnat. G, Hubert. B** (1998). Fondation et ouvrages en terre. Editions Eyrolles.
- [98] **Rionsosl. K, Hidel. K** (1973). Embankment dams with asphaltic concrete cores. Experience and test result. *XI<sup>ème</sup>, ICOLD, Madrid, Q.42, R.45, pp 808-823.*
- [99] **Romain. T** (2011). Première approche de la capacité isolante des enrobes a forte porosité. Projet de Fin d'Études, École de Technologie Supérieure de Montréal. Strasbourg.
- [100] **Sakaa. B** (2013). Développement durable, vers un modèle de gestion intégrée des ressources en eau bassin versant Saf-Saf Nord- Est Algérien. *Thèse de Doctorat, Université Annaba, Algérie.*
- [101] **Saoula. S, Haddadi. S, Ait Mokhtar K** (2009). Performances mécaniques des bétons bitumineux modifiés a base d'additifs polymères. BEIDCO – 1<sup>st</sup> International conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing countries ENSET Oran (Alegria).

## Références bibliographiques

---

- [102] **Schoenian. E** (1994). Bitumen in Hydraulic Engineering. International Petroleum Company, London.
- [103] **Skempton. AW, Brogan. JM** (1994). Experiments on piping in sandy gravels. Revue géotechnique, vol 44, n° 3, p 440-460.
- [104] **Taylor. KV** (1973). Slope protection on earth and rockfill dam. *XI<sup>ème</sup>, ICOLD, Madrid, Q.42, R.13, pp 215-235.*
- [105] **Terry D, Bertrand B** (2009). Deux cas d'étanchéité de barrages en Amérique du sud par géomembranes bitumineuses. Rencontre géosynthétique, pp 223-232.
- [106] **Tnnernofer. K** (1973). Asphaltic concrete facing of the Rifa, Partener and Latshan. *XI<sup>ème</sup>, ICOLD, Madrid, Q.42, R.46, pp 824-833.*
- [107] **USIRF** (2013). Le bitume : histoire d'un matériau routier. Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française, 24 p.
- [108] **Vergnieaud, Drouhin** (1936). Barrages du Bakhadda et de Bou-hanifia. Annales institut technique du bâtiment.
- [109] **Verhasselt. A** (1999). The aging of hydrocarbon binders and their simulation, Euorbitume workshop 99 - performance related properties for bituminous binders.
- [110] **Wappro 40, Plat 2, Werkstandard** (1973). Bitumen in Talsperren bau, Bitumenoese Oberflaechen dichtuug. 36 seite, Halle, Germany.
- [111] **W Gottfried, et Fabienne. M** (2000). Matériaux polymères : structure, propriétés et applications. paris, : hermès science publication.
- [112] **World Road Association (PIARC) ,Comité technique des routes souples** (1999) Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en techniques routières.,209p.
- [113] **ZOULIKHA. B, Djemili. L** (2009). Comportement mécanique du masque du barrage Bouhnifia (Algérie) en absence de la protection thermique. *Thèse de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.*

### Source site internet

- [114] [\(http://www.scribd.com/doc/304889011/cour-enrobés-ETS\)](http://www.scribd.com/doc/304889011/cour-enrobés-ETS).(cours des enrobés bitumineux). <http://wikiwater.fr/e7-la-construction-de-petits.html>: E7 - La construction de petits barrages de surface.2012
- [115] [www.ulg.ac.be/science](http://www.ulg.ac.be/science). Energie hydroélectrique et barrages. Département d'hydraulique et de transport, Université de Liege 2002.
- [116] [www.industrie-gouv-fr-barrages](http://www.industrie-gouv-fr-barrages) .Barrages. Ministère de l'économie, des Finances et de l'Industrie, DGEMP 2000.
- [117] [www.ASCO-Travaux-publics-org/col](http://www.ASCO-Travaux-publics-org/col) 2002. Tout sur les Travaux publics. Ministère de l'Écologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.
- [118] [www.barrages-cfbr.org/info/documentation](http://www.barrages-cfbr.org/info/documentation)., Barrage en remblai. Pb2002/français.