

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des sciences de l'ingénieur

Année 2009

Département d'Hydraulique

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

# CHOIX ET CONCEPTION DE L'ORGANE DE L'ETANCHEITE DES BARRAGES EN TERRE BARRAGE EL-AGREM JIJEL

Option:

Hydraulique Urbaine et Construction Hydraulique

Par

Mr.Heragmi Ali

DIRECTEUR DE MEMOIRE : M<sup>R</sup> LAKHDAR DJEMILI

M.C UNIVERSITE DE ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :

M<sup>R</sup> HOCINE AMARCHI

M.C UNIVERSITE DE ANNABA

EXAMINATEURS :

M<sup>R</sup> MOHAMED MEKSAOUINE

M.C UNIVERSITE DE ANNABA

M<sup>R</sup> YAHIA HAMMAR

M.C UNIVERSITE DE ANNABA

## REMERCIEMENT

*Ce travail de recherche a été réalisé au département de l'hydraulique Faculté des sciences de l'ingénieur, Université de Badji-Mokhtar Annaba, dans le cadre d'une mémoire de Magister.*

*Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant tous ces années d'étude.*

*En premier lieu j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mon Directeur de mémoire, Monsieur Djemili Lakhdar, Docteur, Maître de conférence, Université Badji-Mokhtar, Annaba, qui n'a ménagé aucun effort pour réaliser ce travail, par ces conseils attentifs et critiques précieuses.*

*Je voudrais remercier le Docteur Hocine Amarchi, d'avoir accepté de présider le Jury, je lui en est très reconnaissant.*

*Je remercie également le Docteur Hammar Yahia et le Docteur Mekssaouine Mohamed d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire.*

*Enfin, je n'oublierai sans doute pas de remercier mes amis, collègues, enseignants, administrateurs et travailleurs de département de l'hydraulique spécialement Zahia.*

# DEDICACE

*A ma mère*

*A mon père*

*A mes frères*

*A mes sœurs en particulier Hanane*

*A tous mes amis en particulier Adel, Assia,*

*travail*

*Je dédie ce*

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>CHAITRE 1: Généralité sur les barrages</b> .....	4
1.1 Définition .....	4
1.2 Différents types de barrage .....	5
1.2.1 Barrage en béton .....	5
1.2.1.1 Typologie et description .....	5
1.2.1.2 Barrage-voûte .....	6
1.2.1.3 Barrages à contreforts .....	7
1.2.1.4 Barrages-poids .....	9
1.2.2 Les barrages en remblai .....	10
1.2.2.1 Barrages en enrochements .....	11
1.2.2.1.1 Construction .....	11
1.2.2.1.2 Enrochements en vrac .....	13
1.2.2.1.3 Enrochements arrimés .....	14
1.2.2.2 Barrages en terre .....	14
1.2.2.2.1 Introduction .....	14
1.2.2.2.2 Définition .....	15
1.2.2.2.3 Différents types de barrage en terre .....	15
1.2.2.2.3.1 Barrage homogène .....	15
1.2.2.2.3.2 Barrage zoné avec noyau étanche .....	16
1.2.2.2.3.3 Barrage à masque amont .....	17
1.3 Avantages et inconvénients de divers type de barrage .....	19
1.3.1 Barrage poids .....	19
1.3.1.1 Avantages .....	19
1.3.1.2 Inconvénients .....	20
1.3.2 Barrage à contrefort .....	20

1.3.2.1 Avantages.....	20
1.3.2.2 Inconvénients.....	20
1.3.3 Barrage à voûte multiple.....	21
1.3.3.1 Avantages.....	21
1.3.3.2 Inconvénients.....	21
1.3.4 Barrage à voûte simple .....	21
1.3.4.1 Avantages.....	21
1.3.4.2 Inconvénients.....	21
1.3.5 Digue en terre /Enrochement à noyau.....	22
1.3.5.1 Avantages.....	22
1.3.5.2 Inconvénients.....	22
1.3.6 Digue à masque amont .....	22
1.3.6.1 Avantages.....	22
1.3.6.2 Inconvénients.....	23
Conclusion .....	23
<b>CHAPITRE 2 :Localisation et caractéristique du barrage étudié .....</b>	<b>24</b>
2.1 Localisation.....	24
2.2 Situation général du bassin versant ... ..	25
2.3 Caractéristiques géométriques du bassin versant.....	26
2.4 Caractéristiques de la retenue.....	27
2.4.1 Précipitation .....	27
2.4.2 Les apports d'El Agrem.....	27
2.4.2.1 Les apports Solides.....	27
2.4.2.2 Les apports liquides.....	28
2.4.3 Les débits de crue/crue de projet.....	28
2.4.3.1 Débit de pointe.....	29
2.4.3.2 Hydrogramme type .....	29
2.5 Caractéristiques de la digue.....	31
2.6 Ouvrages annexes.....	32
2.6.1 Dérivation.....	32
2.6.2 Evacuateur de crues de surface.....	32
2.6.2.1 Options fondamentales.....	32

2.6.2.2 Dispositions constructives.....	32
2.6.2.3 Caractéristiques de l'évacuateur.....	33
2.6.3 Prise d'eau.....	33
2.6.4 Galerie de vidange de font.....	34
Conclusion .....	36
<b>CHAPITRE 3: Etude des variantes</b> .....	<b>37</b>
3.1 Introduction .....	37
3.2 Différents types d'organes d'étanchéité .....	37
3.2.1 Les barrages à noyau.....	38
3.2.1.1 Noyau argileux compacté .....	39
3.2.1.2 Noyau en béton bitumineux .....	39
3.2.2 Les barrages à masque amont .....	40
3.2.2.1 Masque en béton de ciment.....	43
3.2.2.2 Masque en acier.....	43
3.2.2.3 Masque en terre.....	43
3.2.2.4 Masque en béton bitumineux.....	43
3.2.2.4.1 Historique.....	43
3.2.2.4.2 Evolution des masques en béton bitumineux.....	45
3.3 Variantes proposées pour l'étanchéité du barrage El-Agrem.....	48
3.3.1 Barrage à noyau argileux .....	48
3.3.1.1 Conception générale de la digue.....	48
3.3.1.2 Constitution des remblais .....	50
3.3.2 Barrage à masque amont en béton bitumineux.....	51
3.3.2.1 Conception générale de la digue.....	51
3.3.2.2 Description du masque en béton bitumineux .....	52
3.3.3 Barrage à masque amont en béton de ciment .....	54
3.3.3.1 Généralités.....	54
3.3.3.2 Description du masque.....	54

3.3.4 Barrage à noyau central bitumineux.....	56
3.3.4.1 Description du barrage à noyau central bitumineux.....	56
3.4 Etude technico-économique.....	58
3.4.1 Perspective technique.....	58
3.4.2 Perspective économique.....	59
3.4.3 Comparaison économique.....	60
3.4.4 Estimation global.....	61
3.4.5 Résumé des comparaisons économiques.....	61
3.5 Classification des différentes variantes .....	61
3.5.1 Adaptation au site .....	61
3.5.2 Séismicité .....	62
3.5.3 Disponibilité des matériaux .....	62
3.5.4 Difficulté de réalisation .....	63
3.5.5 Coût .....	64
3.5.6 Délai de réalisation .....	64
3.5.7 Résumé de la classification des variantes .....	64
Conclusion .....	65
<b>CHAPITRE 4 : Etude de la répartition de la température sur la surface du masque ...</b>	<b>66</b>
4.1 Introduction.....	66
4.2 Données angulaires, géographiques et géométriques .....	66
4.3 Détail du masque du barrage "El Agrem".....	67
4.4 Rayonnement solaire au sol et rayonnement terrestre.....	68
4.5 Bilan énergétique.....	71
Conclusion générale.....	75
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>78</b>

## Liste des figures

1.1 Les différents types de barrage en béton .....	5
1.2 Exemple d'un Barrage voûte (barrage de St-Pierre-Cognet).....	7
1.3 Différents types de barrages à contreforts .....	8
1.4 Barrage à contre fort (Grandval).....	9
1.5 Coupe transversale d'un barrage en béton .....	9
1.6 Barrage poids à contreforts de Plan d'Amont (Aussois) .....	10
1.7 Les différents types de barrage en remblai .....	11
1.8 Coupe transversale d'un barrage en enrochement .....	12
1.9 Barrage homogène .....	16
1.10 Barrage zoné avec un noyau étanche .....	17
1.11 Barrage à masque étanche.....	18
1.12 Barrage à masque amont .....	19
2.1 Localisation du barrage El Agrem .....	24
2.2 Situation général du bassin versant .....	25
2.3 Bassin versant du barrage El Agrem .....	26
2.4 Hydrogramme des crues observé à Chaddia .....	30
2.5 Coupe –Type de la digue .....	31
2.6 Tour de prise d'eau .....	34
2.7 Conduite de dérivation et de vidange.....	35
3.1 Barrage à noyau.....	38
3.2 Barrage à noyau de béton bitumineux.....	39
3.3 Barrage à masque amont en béton.....	42
3.4 Types de masque en béton bitumineux.....	47
3.5 Barrage à noyau argileux « coupe-type de la digue» .....	51
3.6 Coupe –type « Masque en béton bitumineux » .....	53
3.7 Coupe-type « digue en béton de ciment » .....	56
3.8 Coupe-type « Barrage à noyau en béton bitumineux ».....	58

4.1 Coupe du masque bitumineux.....	68
4.2 Rayonnement solaire et rayonnement terrestre.....	70
4.3 Schéma explicatif de l'équation du bilan énergétique.....	71
4.4 Variation de la température maximale mesurée sur la surface en fonction du temps.....	73
4.5 Variation de la température maximale calculée sur la surface et à une profondeur de 6 cm.....	74

# Liste des tableaux

2.1 Les débit de pointe adopté pour le barrage El Agrem.....	29
3.1 Devis estimatif des variantes.....	60
3.2 Comparaison économique des variantes.....	61
3.3 Cadence mensuelles de mise en remblai.....	64
3.4 Classification des variantes .....	65

# INTRODUCTION GENERALE

L'édification d'ouvrages à travers des cours d'eau, en vue d'y prélever une part plus ou moins importante du débit, compte parmi les activités les plus anciennes de l'humanité : les œuvres modernes, bénéficiant des progrès continus de la technique, ont vu leurs tailles s'accroître, leurs formes s'élaborer, leurs buts se diversifier, mais chacune d'elles peut se reconnaître en un ancêtre, même à l'état embryonnaire [21].

Le but primitif, et qui demeure toujours l'un des objectifs essentiels dans la plus part des régions du globe, est l'irrigation. La régularisation, réclamée par l'agriculture, des débits au cours de l'année conduit à créer des réservoirs saisonniers d'une capacité d'autant plus grande que l'on cherche à contrôler une fraction plus forte des apports annuels du cours d'eau ; à cet effet, il faut bâtir des barrages de plus en plus importants, par leur hauteur ou leur longueur. De tels lacs artificiels permettent, de réduire, dans une certaine mesure les dégâts occasionnés par les crues dont les pointes les plus sévères peuvent être écrêtées[17-21].

Le premier barrage connu a été construit en Egypte, vers 4000 av. J-C., pour faire dévier le Nil afin de créer un site pour la ville de Memphis. De nombreux barrages ont été bâtis durant l'antiquité notamment par les Babyloniens, pour former des systèmes d'irrigation élaborés, qui ont permis de rendre fertiles des régions jusque là improductives en eau d'importantes populations [2-4].

Par la suite, l'homme a eu l'idée d'utiliser l'énergie des cours d'eau pour faire tourner des moulins et des machines à eau. En raison des ravages provoqués par les inondations périodiques, peu de barrages vieux de plus d'un siècle sont encore fonctionnels [2-4].

En fin, les barrages sont construits à d'autres fins : protection contre les crues, lutte contre l'incendie, navigation, création de polders, protection des estuaires contre les remontées d'eau salée depuis la mer, alimentation en eau potable, usages industriels, tourisme et loisirs[4].

Par le matériau dont ils sont construits, les barrages peuvent être classés en deux groupes :

- les barrages rigides, en béton ou en maçonnerie
- les barrages souples, en enrochement ou en terre

En Algérie, il existe d'après le recensement de l'Agence Nationale des Barrages "2003" 52 barrages dont 32 en terre, 11 en béton et 7 en enrochement [4].

Pour les barrages en terre les volumes de matériaux à mettre en œuvre sont très importants, de 5 à 15 fois et plus le volume de béton qui serait nécessaire pour un barrage-poids s'inscrivant dans le même site. La valeur d'une terre, après extraction mais avant mise en œuvre, étant bien plus faible que pour le béton. Cette condition impérative conditionne le projet du barrage en terre. Le barrage en terre est le seul qui convient à une fondation non rocheuse, il présente l'avantage de pouvoir être adapté à peu près à n'importe quelle fondation, et de pouvoir être réalisé avec une très grande variété de sols. L'inconvénient majeur du barrage en terre est les infiltrations à travers le massif [4].

Sur le plan technique, la conception d'un barrage en terre répond à deux exigences principales : l'étanchéité et la stabilité de l'ouvrage [4].

Les infiltrations qui peuvent se produire à travers les barrages en terre doivent être étudiées sous deux angles différents [4]:

- D'une part, elles peuvent mettre en jeu la sécurité de l'ouvrage et compromettre sa stabilité si certaines précautions ne sont prises contre les risques qu'entraînent les renards et les pressions de filtration.
- D'autre part, elles sont pour conséquences des pertes d'eau dont il faut réduire le volume à une valeur déterminée dépendant de l'économie générale du projet.

Les infiltrations qui se produisent à travers le barrage sont responsables de plus de 35% des accidents survenus aux barrages en terre. Elles sont, en effet, la cause de deux phénomènes différents [4]:

- 1 Elles peuvent entraîner des particules de terre en émergeant avec une vitesse suffisante

au pied du barrage ou en un point quelconque de son talus aval ; cet entraînement de matériau peut s'accroître jusqu'à former un tunnel s'érodant progressivement vers l'amont; ce phénomène d'érosion régressive constitue le phénomène de renard proprement dit.

- 2 Elles peuvent soulever, par l'effet de la pression hydrostatique interne, une masse de terre plus ou moins importante à l'aval du barrage et ruiner l'ouvrage par sous-pression.

Il existe plusieurs organes d'étanchéité tels que : noyau en terre, noyau en béton bitumineux, masque en béton bitumineux, masque en béton armé, écran interne en béton bitumineux et paroi moulée en béton ou en béton armé. Le choix de l'organe est peut être l'un des éléments les plus importants du processus de conception et de construction des barrages en terre, car il peut influencer l'étude, le calcul et l'économie du barrage [4].

Ce travail contribue à mettre à la disposition des ingénieurs praticiens comment faire le choix de l'organe de l'étanchéité des barrages en remblai et montre que l'organe de l'étanchéité du barrage cité à été mal choisi. Pour aboutir à ce but on a adopté la méthodologie suivante :

Après une introduction générale, le premier chapitre, donne des notions générales sur les différents types de barrages.

Le second chapitre, décrit brièvement la localisation et les caractéristiques du barrage étudié.

Le troisième chapitre, qui représente la partie la plus importante du travail, traite en détail les différentes variantes proposées pour l'étanchéité et comment chercher l'organe le plus économique et le plus facile à réaliser.

Le quatrième chapitre étudie la répartition de la température sur la surface du masque.

Enfin, une conclusion générale, des annexes et une bibliographie qui se rapporte aux différents sujets traités dans ce travail.

# CHAPITRE 1

## GENERALITE SUR LES BARRAGES

### 1.1 Définition

Un barrage est un ouvrage d'Art placé en travers d'un cours d'eau, destiné à retenir et stocker de l'eau ou à la dériver [2].

Les techniques de la fin du XIX e et du début du XX e siècle ne permettaient pas l'édification de retenues 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 [2].

L'amélioration des techniques et des bétons dans le premier quart du XX e siècle permet d'envisager la réalisation de retenues plus conséquentes, capables de réguler la production hydro-électrique [2].

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 [2].

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 [2].

De plus, certains sont formés par la juxtaposition de plusieurs structures différentes justifiées par des caractéristiques de sol de fondation particulières et aussi par des choix économiques [2].

Les barrages peuvent être classés en deux groupes :

- Les barrages rigides, en béton ou en maçonnerie,
- Les barrages souples, en enrochement ou en terre,

Les premiers font l'objet de nombreuses méthodes de calcul basées sur la résistance des matériaux et la théorie de l'élasticité notamment [4].

Les seconds, et surtout les barrages en terre, sont un des principaux champs d'application de la mécanique des sols [4].

## 1.2 Différents types de barrage

### 1.2.1 Barrage en béton

Les barrages en béton se partagent en trois groupes [14] (Figure 1.1)

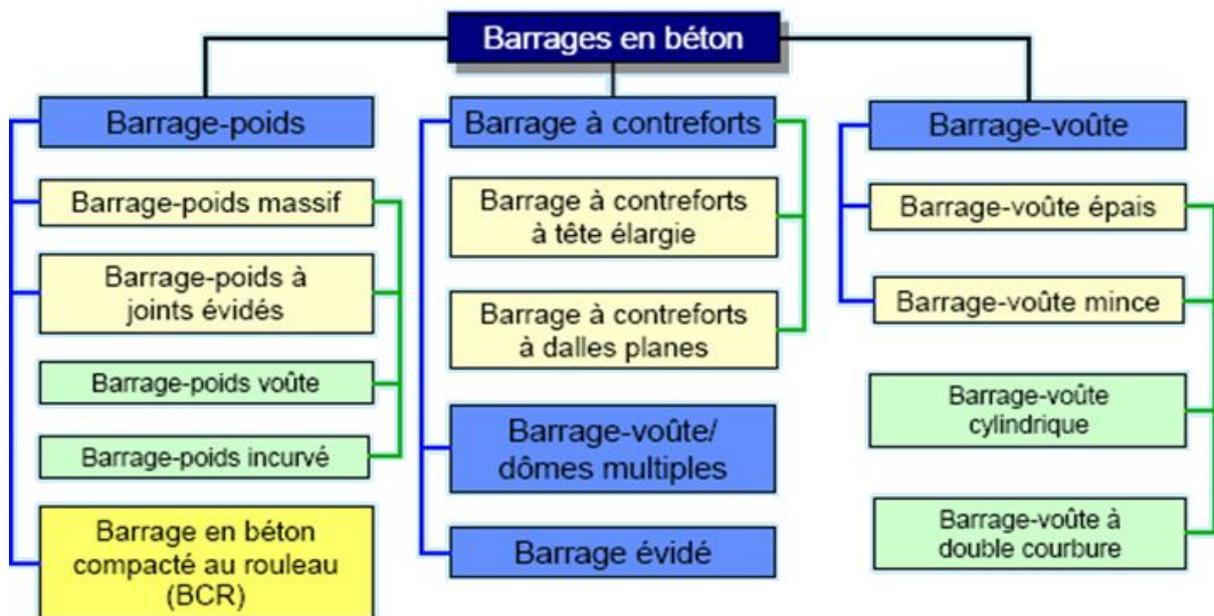


Figure 1.1 : Les différents types de barrage en béton

#### 1.2.1.1 Typologie et description

Les petits barrages en béton se regroupent principalement en trois types :

### • Barrages voûtes

Ils résistent à la poussée de l'eau par leur forme qui leur permet de répercuter la poussée hydrostatique sur la fondation par des arcs travaillant en compression. La voûte des ouvrages de faible hauteur, peut être très mince et présente une simple courbure[14-4 ].

### • Barrages poids

Par leur poids et par leur section trapézoïdale, ils résistent à la poussée de l'eau. Tout comme les barrages en maçonnerie, les barrages en béton sont des ouvrages rigides et en conséquence leur conception sera aussi conditionnée par la qualité des fondations[14 ].

### • Barrages à contreforts

Ils sont composés d'un voile en béton armé et d'une série de contreforts destinés à reprendre la poussée de l'eau et à la transmettre à la fondation [14-13].

#### 1.2.1.2 Barrage-voûte

Il est généralement en béton dont la forme courbe permet report des efforts de poussée de l'eau sur les rives rocheuses de la vallée [14].

Ce type de barrage convient bien lorsque la topographie permet de fermer la vallée par une forme arquée de longueur réduite (figure 1.2 ).

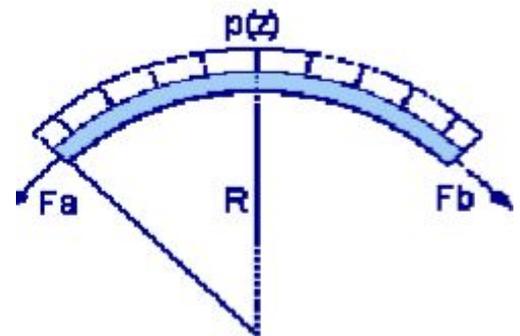
Les barrages-voûtes sont en effet peu employés pour les retenues de petite hauteur. Les conditions pour adopter une telle solution sont par ailleurs assez strictes. Nous envisageons en effet la construction d'un barrage-voûte que lorsque la vallée est étroite et rocheuse [14].

La qualité mécanique de la fondation est à vérifiée scrupuleusement. Sa rigidité doit être suffisante pour que les arcs trouvent leurs appuis en première approximation, nous devons s'assurer que le module de déformation du rocher dépasse 4 ou 5 Gpa. Mais elle devra également ne pas se rompre sous l'effet des contraintes élevées transmises par la voûte[14 ].

Le choix d'un barrage-voûte est donc à réserver à des situations géomorphologiques bien particulières (figure 1.2) [16].

Cependant, lorsqu'elles sont réunies, c'est une solution qui peut être économiquement viable en regard des quantités de matériaux nécessaires à la réalisation d'un ouvrage poids [14].

En outre, face aux incertitudes hydrologiques, ce type de construction supporte des submersions [14-16].



**Figure 1.2 : Exemple d'un Barrage voûte (barrage de St-Pierre-Cognet)**

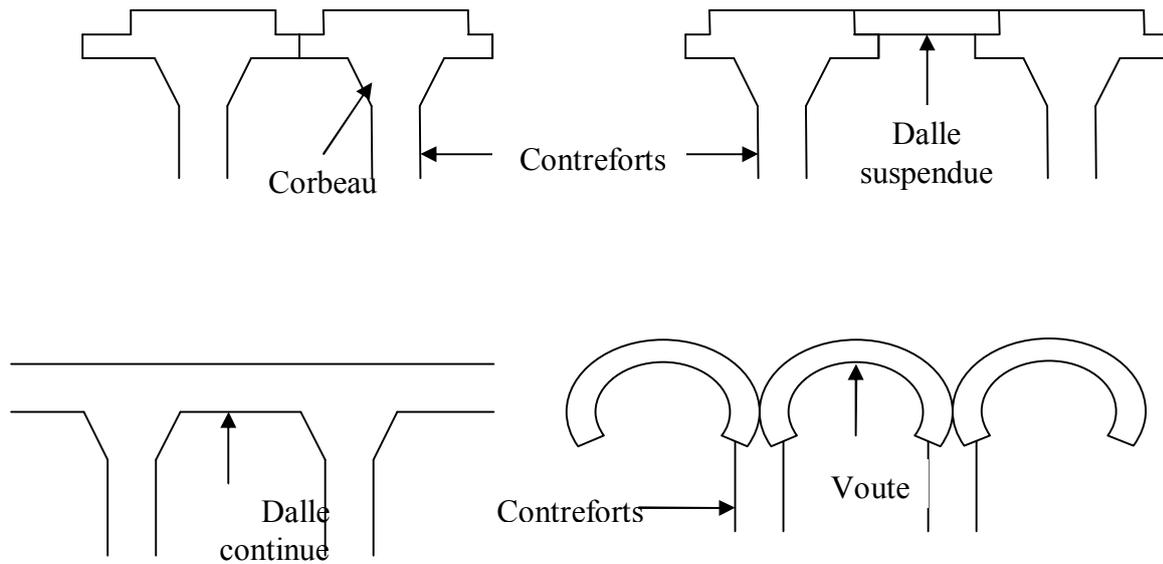
### 1.2.1.3 Barrages à contreforts

Il est constitué (figure 1.4) :

- D'une série de murs parallèles, généralement de forme triangulaire, plus ou moins épais et plus ou moins espacés (les contreforts);
- D'une bouchure entre les contreforts transmettant à ceux ci la poussée de l'eau.

Il est bien adapté aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité [ 19-21 ].

Dans des vallées plus larges où le barrage-poids supposerait des volumes de béton trop importants et où le barrage voûte ne serait pas réalisable, nous pensons à construire des barrages à contreforts, par ailleurs beaucoup moins sensibles aux sous-pressions que le barrage-poids, mais plus fragiles (figure 1.3) [ 4 ].



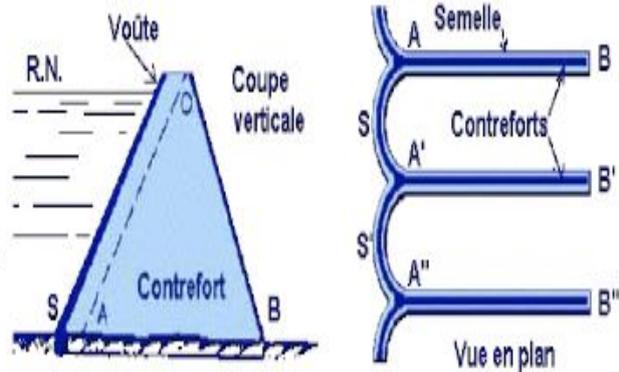
**Figure 1.3 : Différents types de barrages à contreforts**

Dans ce type d'ouvrages, l'étanchéité est assurée par le voile en béton armé situé en amont et la stabilité vis à vis de la poussée de l'eau par les contreforts [4].

Il faut noter que la stabilité est améliorée en donnant un fruit de 0,5 à 1/1 au voile, car la poussée de l'eau comporte alors une composante verticale dirigée vers le bas [4].

Le voile peut être conçu de plusieurs façons (figure 1.3) [4] :

- Solidaire des contreforts avec parement amont plan. Les diverses sections de voile sont liées aux contreforts et fonctionnent en consoles courtes ;
- Constitué d'une dalle posée aux extrémités sur les têtes des contreforts. Le voile travaille en flexion comme une poutre posée sur deux appuis simples aux extrémités ;
- Solidaire des contreforts avec parement amont cylindrique. Cette disposition massive facilite la transmission de la poussée au contrefort ;
- Constitue d'une voûte de faible portée et donc de faible épaisseur s'appuyant sur les contreforts.



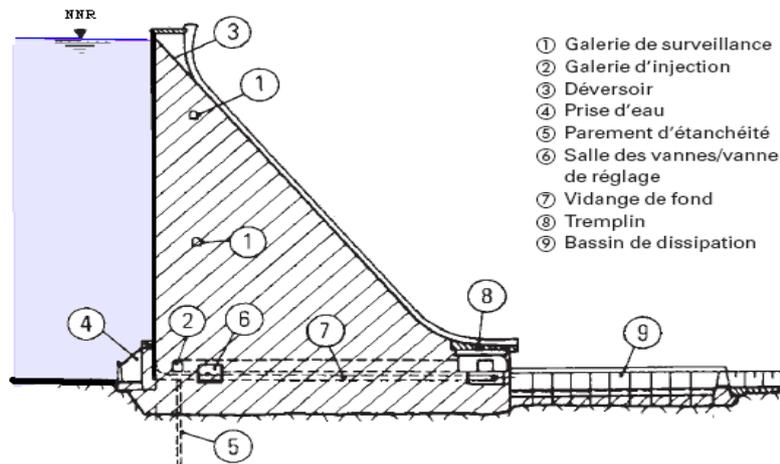
**Figure 1.4 : Barrage à contre fort (Grandval)**

### 1.2.1.4 Barrages-poids

Les barrages poids en béton sont très proches mécaniquement des barrages en maçonnerie [19].

Seul le poids en effet résiste, à la poussée hydrostatique, à la poussée des sédiments et aux sous-pressions. Celles-ci ont une action déstabilisatrice très importante et il conviendra de les diminuer à l'aide de dispositifs tels que rideaux d'injection et galeries de drainage [19].

Quoi qu'il en soit, le calcul de l'ouvrage, par ailleurs peu complexe, devra les prendre soigneusement en compte [4].



**Figure 1.5 : Coupe transversale d'un barrage en béton**

Les profils adoptés pour ces ouvrages sont bien souvent un compromis technico-économique découlant directement de calculs de stabilité [14].

De plus, nous évitons autant que possible des formes complexes qui entraînent une augmentation inutile du coût de coffrages [14].

Enfin, pour améliorer l'étanchéité du contact béton fondation et la résistance au glissement, il sera souvent bénéfique de réaliser une clé d'ancrage armée [2-7].

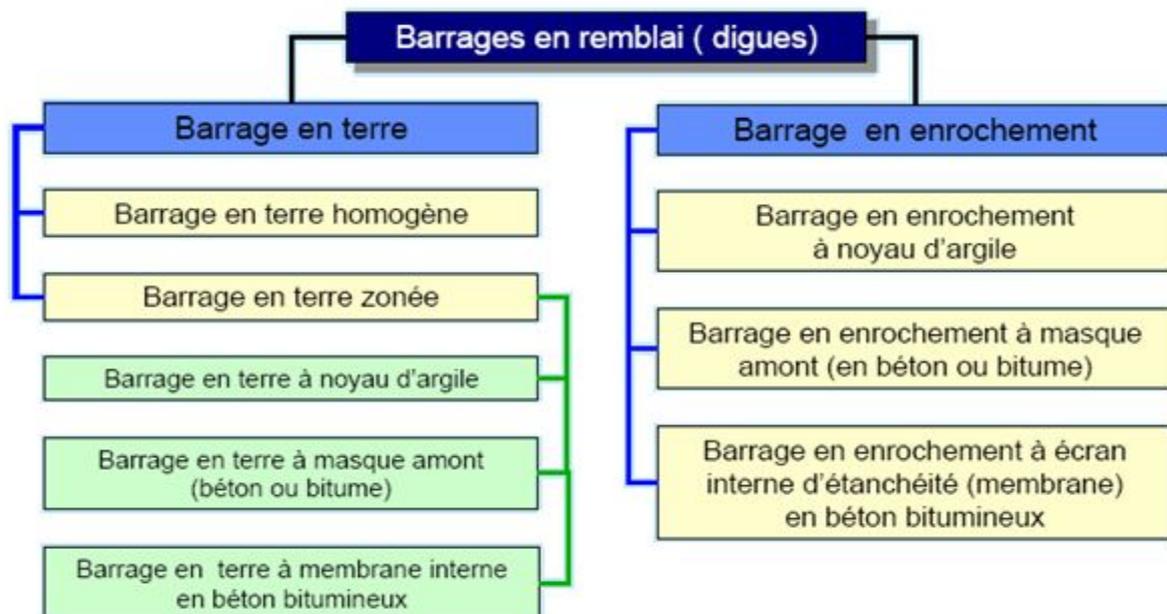
Les barrages-poids, de forme massive et triangulaire, résistent à la poussée de l'eau grâce à leur poids (figure 1.5) [9].



**Figure 1.6 : Barrage poids à contreforts de Plan d'Amont (Aussois)**

### 1.2.2 Les barrages en remblai

Les barrages en remblai se partages en deux groupes (Figure 1.6) [14 ]



**Figure 1.7 : Les différents types de barrage en remblai**

### **1.2.2.1 Barrages en enrochements**

Un barrage en enrochement n'est pas autre chose qu'un tas de cailloux à grande échelle, qui résiste par sa masse aux efforts auxquels il est soumis [16-4].

Mais n'étant pas étanche par lui-même, il faut lui adjoindre un organe d'étanchéité qui constitue la partie la plus délicate, aussi bien au stade du projet qu'à celui de la réalisation.

#### **1.2.2.1.1 Construction**

De même que sur quelques mètres, le parement aval est constitué par des enrochements rangés, mais pour des raisons différentes. C'est que l'intérieur du massif, si des blocs ne sont pas en équilibre stable et que, par suite d'une cause ou d'une autre, cet équilibre est détruit, il se produit un réarrangement des blocs qui se traduit simplement par un certain tassement [18].

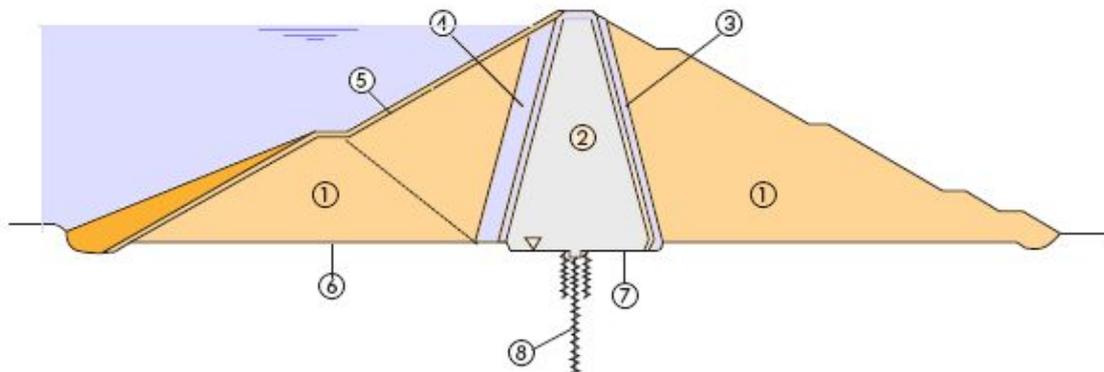
Ceci dit, la mise en place du massif proprement dit d'enrochements peut être effectuée de plusieurs manières [18].

Sur le parement aval, l'équilibre pourrait être rompu de manière à ce qu'un bloc soit éjecté du massif et roule sur le parement aval, ce qui formerait un trou amorce de déséquilibres ultérieurs pour la même raison le pied aval sera constitué d'enrochement rangés[19].

Pour des raisons de statique et d'hydraulique, le corps d'un barrage en béton ou remblayé doit être relié à un parement vertical d'étanchéité qui s'enfonce profondément dans le sous-sol rocheux. La profondeur de cet élément étanche dépend de la hauteur du barrage, donc de la pression dynamique [19].

Le parement d'étanchéité peut être réalisé avant ou pendant les travaux de construction du barrage. Dans le dernier cas, le parement est effectué à partir d'une galerie de surveillance située dans le corps du barrage. Si, après stockage des eaux, une fuite apparaît dans le parement, l'eau d'infiltration sera évacuée dans la galerie de surveillance par un drain situé sur le pied du parement [19].

En outre, cette galerie servira d'entrée pour effectuer plus tard des travaux d'étanchéité et des missions de contrôle [19].



**Figure 1.8: Coupe transversale d'un barrage en enrochement**

**Légende :**

- 1) Enrochement, taille maximale 1000 mm
- 2) Noyau étanche en matériau limoneux et argileux
- 3) Filtres-drains en matériau grossier et en matériau fin, de 2,0 m chacun
- 4) Zone de transition, granulométrie maximale du matériau 150 mm
- 5) Rip-rap
- 6) Fondation en blocaille naturelle
- 7) Fondation sur terrain en place
- 8) Voile d'étanchéité

**1.2.2.1.2 Enrochements en vrac**

Ils sont simplement déversés depuis des wagons circulant sur une voie, ou depuis des camions. Pour accélérer le tassement, nous arrosons le remblai ainsi formé avec de l'eau sous pression ( $7 \text{ kg/cm}^2$ ) ; l'eau enlève les poussières restées collées aux enrochements ou produites par les chocs au moment de la mise en place, la pression produit un certain compactage, et entraîne les plus petits enrochements dans les intervalles des plus gros [4].

La consommation d'eau est élevée, plusieurs fois le volume d'enrochements, mais cette technique est essentielle pour diminuer les tassements à des valeurs de l'ordre de 1% [4].

La grosseur des blocs doit être la plus grande possible compte tenu du matériel de transport dont nous disposons, ceci pour une question économique : qui va de quelques centaines de litres à plusieurs mètres cubes [4].

Il est recommandé de prévoir la construction du massif par étages successifs, d'une dizaine de mètres de hauteur par exemple, pour éviter le déversement des enrochements sur une grande hauteur qui d'une part provoque une certaine ségrégation et d'autre part provoque dans le massif des tassements irréguliers [4 -13].

Les chocs des blocs tombant et roulant sur les enrochements déjà en place produisent un certain compactage et sont donc favorables, et constituent comme un essai de qualité pour les blocs : ceux qui se cassent ainsi auraient fini par casser, mais après la mise en service de l'ouvrage, ce qui produit alors des tassements différés plus gênants [13].

Cependant, de plus en plus, on compacte les enrochements mis en place en couches de 0,5 à 2 ou 3 m au moyen de rouleaux vibrants, lourds (8t), exactement comme s'il s'agissait d'un massif de terre [13].

Les tassements résiduels, après mise en eau, se comptent alors en dixièmes d'unités pour cent, et la consommation d'eau est bien plus faible (500 litres/m<sup>3</sup> d'enrochement, par exemple) [13].

### **1.2.2.1.3 Enrochements arrimés**

Nous réalisons ainsi, soit l'ensemble du massif pour réduire les fruits des parements, soit surtout les parements seulement sur quelques mètres d'épaisseur. Si les blocs sont trop lourds, ils sont mis en place à la grue, les intervalles étant bouchés par de petits enrochements mis en place à la main [4-18].

## **1.2.3 Barrages en terre**

### **1.2.3.1 Introduction**

Les barrages en terre peuvent être constitués par des matériaux de caractéristiques divers, à la différence des barrages en béton ou même en enrochement dont les matériaux constitutifs restent contenus dans des fourchettes beaucoup plus étroites [4].

Tout ingénieur étudiant et projetant un barrage doit adopter la solution la plus économique résolvant le problème posé [4].

Une solution, et parfois même la seule solution, est la construction de la digue à partir de matériaux se trouvant dans le site du barrage projeté [4].

D'une manière générale si l'on dispose sur place et en quantité suffisante de matériaux terreux permettant d'obtenir après compactage des conditions d'étanchéité et de stabilité satisfaisantes. Ainsi le type de barrage le plus facile à réaliser est le barrage homogène [9].

Les ouvrages en terre ont atteint de nos jours d'énormes proportions. Le plus imposant d'entre eux est le barrage d'Oroville au U.S.A de 235 m de hauteur qui a nécessité la mise en place de 61 millions de m<sup>3</sup> de matériaux. Le plus volumineux ouvrage du monde est le barrage de New Cornella Tailigs au U.S.A qui atteint 209,5 millions de m<sup>3</sup> pour 30 m de hauteur [9].

En France, l'ouvrage de ce type le plus important est celui de Serre Poncon, haut de 129 m sur fondations et d'un volume de 14 millions de m<sup>3</sup>. En Russie, le barrage de Rogun est le record mondial de hauteur devant le barrage de Nurek, avec une hauteur de 335 m au lieu de 300 m [16].

### **1.2.3.2 Définition**

Le terme "Terre" doit être, pour les ingénieurs, pris dans le sens le plus large du mot et sert à désigner toute sorte de matériaux terreux comprenant non seulement les différents sols définis par le pédologue, mais aussi l'ensemble des matériaux provenant de la désagrégation ou de la décomposition des roches [17].

Les barrages en terre sont des murs de retenue d'eaux suffisamment étanches construits avec la terre et les matériaux du site suivant des mélanges et des proportions bien définies [4].

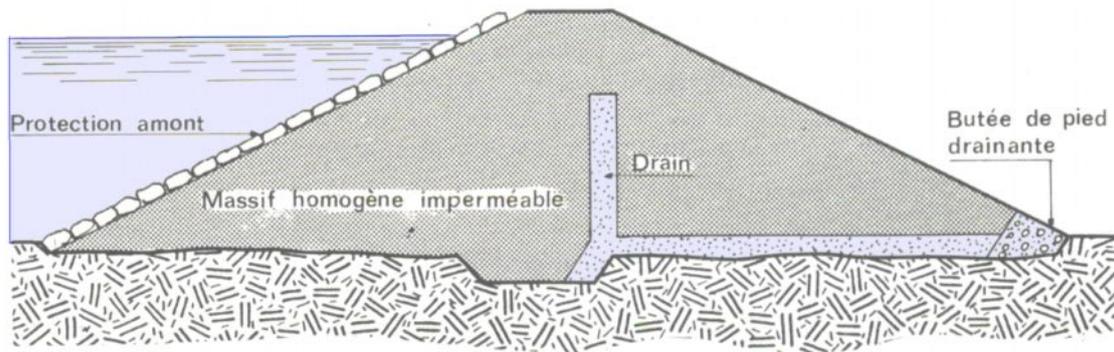
### **1.2.3.3 Différents types de barrages en terre**

Il existe trois schémas principaux de structure de barrage en terre [13] :

- Le barrage homogène,
- Le barrage à noyau étanche,
- Le barrage à masque d'étanchéité.

#### **1.2.3.3.1 Barrage homogène**

Le barrage en terre homogène est constitué d'un massif en terre compactée imperméable, muni d'un dispositif de drains dans sa partie aval et d'une protection mécanique contre l'effet du battillage dans sa partie amont (figure 1.9) [4-14].



**Figure 1.9: Barrage homogène**

#### 1.2.3.3.2 Barrage zoné avec un noyau étanche

Souvent l'hétérogénéité des matériaux disponibles sur place ou leurs caractéristiques géotechniques ne permettent pas d'envisager une digue homogène étanche (figure 1.10) [4].

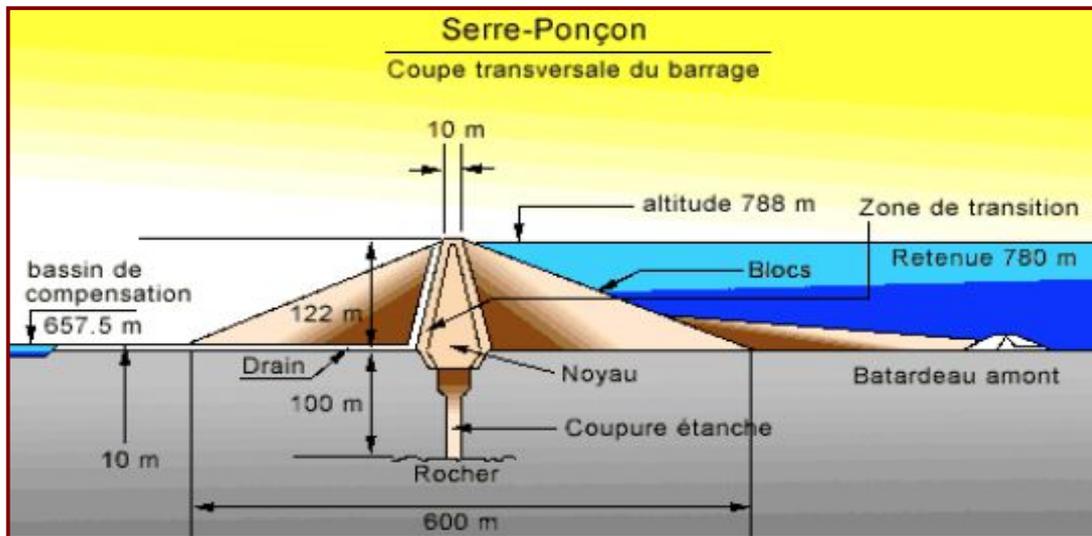
Dans ce cas, une solution couramment adoptée consiste à concevoir un massif en plusieurs zones, dont chacune est constituée d'un matériau différent suivant le rôle que doit jouer chaque zone [4].

La fonction d'étanchéité est assurée par un noyau étanche réalisé en matériau argileux qui pourra être placé en amont du barrage ou au centre de celui-ci [4].

Les barrages zonés, comme le barrage de Serre-Ponçon (Hautes Alpes  $h=24$  m), sont des barrages en remblai constitués de plusieurs types des matériaux disposées de façon à assurer séparément les fonctions de stabilité du barrage et l'étanchéité [6].

Le découpage du corps du barrage en matériaux différents est appelé zonage. Il permet de faire de grande économies dans les volumes mis en œuvre et d'utiliser au mieux les matériaux disponibles sur le site. Le noyau imperméable est constitué de terres argileuses, d'argile, de terres caillouteuses ou tout autre matériau terreux comportant une forte proportion de matériaux fins lui peut avoir recours à des matériaux de substitution tels qu'une paroi moulée ou bien une superposition de couche de béton bitumineux ou d'asphalte [16].

Les zones encadrant le noyau imperméable sont en tout venant compacté, elles assurent la résistance et la stabilité du barrage, en particulier pour le talus amont en cas de vidange rapide [16].



**Figure 1.10 : Barrage zoné avec un noyau étanche**

### 1.2.3.3.3 Barrage à masque amont

Les barrages à masque sont constitués d'un remblai plus ou moins perméable assurant la stabilité d'ensemble. Un écran imperméable, appelé masque, est mis en place sur le parement amont de façon à rendre le barrage étanche et lui permettre de retenir l'eau du réservoir (figure 1.11) [4].

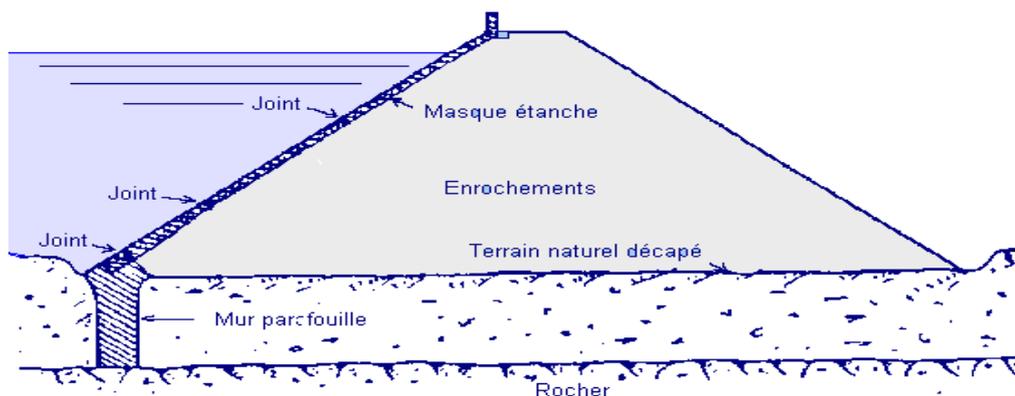
Le masque qui constitue l'organe d'étanchéité amont est classiquement réalisé en béton, avec des produits bitumineux ou encore au moyen d'une géomembrane. Son épaisseur est limitée, ce qui lui permet de s'adapter aux déformations faibles mais inévitables du massif support (les géomembranes peuvent même accepter des déformations importantes). 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 rapides [16].

Le corps du barrage assurant la stabilité peut être en matériau quelconque pour autant qu'il soit peu déformable [16].

De nombreux barrages à masque sont réalisés en enrochements. La qualité du compactage lors de la mise en oeuvre du matériau a une grande influence sur les déformations et tassements ultérieurs [14].

Pour améliorer la sécurité du barrage, il n'est pas rare de trouver dans les barrages à masque d'autres matériaux fonctionnels [12].

- ❖ 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 drainant, un tapis drainant ou les deux pour évacuer les infiltrations éventuelles à travers le masque ;
- ❖ des matériaux de protection soit du parement aval (terre végétale engazonnée, enrochements, maçonnerie de pierres sèches, soit du masque d'étanchéité comme des dalles de protection ou des pavés auto-bloquants mettant l'étanchéité mince à l'abri des agressions extérieures telles que la glace, les projectiles ou les chutes de blocs.



**Figure 1.11 : Barrage à masque étanche**

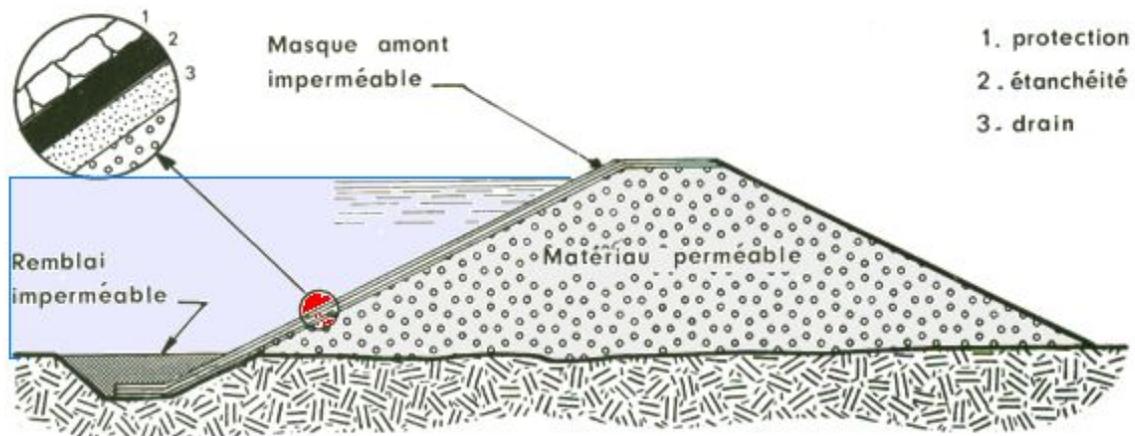
La réalisation d'un noyau étanche peut présenter des difficultés telles que le manque de matériaux convenables et la difficulté de mise en oeuvre [12].

Nous devons comparer alors cette technique à celle d'une digue homogène à masque amont étanche [4].

Le masque amont (Figure 1.12) est une paroi étanche plaquée sur le talus amont du barrage [4-15].

Il existe de nombreuses natures de masque étanche telles que le béton de ciment ou le béton bitumineux, les chapes préfabriquées, les membranes souples [16].

Le masque amont présente l'avantage de pouvoir être exécuté après l'édification du remblai et de pouvoir être réparé aisément [16].



**Figure 1.12 : Barrage à masque amont**

### 1.3 Avantages et inconvénients de divers type de barrage

#### 1.3.1 Barrage poids

##### 1.3.1.1 Avantages [16-17]

- ⇒ Faibles contraintes dans le béton .
- ⇒ Faibles contraintes transmises par la fondation au rocher.
- ⇒ Les variations de températures ne produisent que de faibles variations de contraintes.
- ⇒ L'évacuateur de crue peut facilement combiner avec le barrage (diriger les crues directement par dessous).
- ⇒ Le gradient des sous-pressions à travers la fondation est faible.
- ⇒ Les points délicats sont : la résistance mécanique et l'étanchéité.

##### 1.3.1.2 Inconvénients [4-17]

- ⇒ Les sous-pressions sont importantes dans la fondation.
- ⇒ Moyen risque de tassement.
- ⇒ Le volume du béton est important (pour le barrage-poids évidé, il est plus faible).
- ⇒ Le volume d'excavation de la fouille est important.

- ⇒ Fragilité au séisme (si les joints entre les blocs ne sont pas faits par injections).
- ⇒ L'échauffement du béton par la prise du ciment est assez problématique.

### **1.3.2 Barrage à contrefort**

#### **1.3.2.1 Avantages [16-17]**

- ⇒ Les contraintes transmises par la fondation au rocher sont moyennes.
- ⇒ Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles.
- ⇒ Le volume du béton est faible.
- ⇒ L'échauffement du béton est faible.
- ⇒ Les risques de tassements sont moyens.

#### **1.3.2.2 Inconvénients [16-17]**

- ⇒ Très susceptible au séisme. La résistance à l'accélération latérale est presque inexistante.
- ⇒ La fouille est importante.
- ⇒ Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation est localement très élevé.
- ⇒ Les contraintes dues au gradient de température peuvent devenir importantes à la tête du contrefort.

### **1.3.3 Barrage à voûte multiple**

#### **1.3.3.1 Avantages [4-17]**

- ⇒ Le volume du béton est faible.
- ⇒ La fouille est assez petite.
- ⇒ Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles.
- ⇒ L'échauffement du béton est très faible pendant la construction.

#### **1.3.3.2 Inconvénients [16-17]**

- ⇒ Les contraintes sont importantes dans les voûtes.
- ⇒ Grand risque de tassements. Les contraintes de température peuvent être très grandes.
- ⇒ Très susceptible au séisme.
- ⇒ La combinaison du barrage avec l'évacuateur de crue est difficile.
- ⇒ Les sous-pressions dans les fissures du rocher peuvent provoquer des glissements d'appuis.
- ⇒ La structure est très vulnérable (attentats, guerre).

### **1.3.4 Barrage à voûte**

#### **1.3.4.1 Avantages [4-17]**

- ⇒ Le volume du béton est faible.
- ⇒ La fouille est assez petite.
- ⇒ La résistance au séisme est haute.
- ⇒ Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles (la surface de la fondation est petite).

#### **1.3.4.2 Inconvénients [16]**

- ⇒ Les contraintes sont importantes dans le béton et dans le rocher.
- ⇒ Les forces sont transmises obliquement dans les appuis.
- ⇒ Moyen risque de tassements.
- ⇒ L'échauffement du béton par la prise du ciment est à considérer.
- ⇒ L'intégration de l'évacuateur de crues (grands débits) dans le barrage est difficile.
- ⇒ Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation est très grand.
- ⇒ Les sous-pressions dans les fissures du rocher peuvent provoquer des glissements d'appuis.

### **1.3.5 Digue en terre /Enrochement à noyau**

#### **1.3.5.1 Avantages [22]**

- ⇒ Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions du terrain.
- ⇒ Peu susceptible aux tassements et aux séismes.
- ⇒ Petite à moyenne fouille. La digue n'est pas forcément fondé sur un rocher sain.
- ⇒ La compression du sol est faible.

⇒ Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation ou du noyau est faible.

### **1.3.5.2 Inconvénients [4-22]**

⇒ Mise en place de grands volumes de matériaux.

⇒ Le remblai du noyau en argile est influencé par les conditions atmosphériques (climat pluie).

⇒ L'inconvénient majeur est les infiltrations à travers le massif.

### **1.3.6 Digue à masque amont (béton ou béton bitumineux)**

#### **1.3.6.1 Avantages [4-17]**

⇒ Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions du terrain.

⇒ Les tassements limités sont tolérables.

⇒ Pas très susceptible au séisme. Au dessous du masque, un système de drainage performant est nécessaire à cause de la fissuration.

⇒ Le volume des déblais est moyen.

⇒ Le masque doit être connecté au rocher (directement ou par une parafouille).

⇒ La compression du sol est faible.

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

⇒ Le masque amont présente l'avantage de pouvoir être exécuté après l'édification du remblai et de pouvoir être réparé aisément.

⇒ Diminué les infiltration à travers le massif.

#### **1.3.6.2 Inconvénients [1-2]**

⇒ Mise en place de grands volumes de matériaux.

⇒ Le gradient est très élevé près de la connexion entre le masque et le rocher (plinthe).

### **Conclusion**

Les barrages en terre sont les seuls qui conviennent à une fondation non rocheuse, ils présentent l'avantage de pouvoir être adaptés à peu près à n'importe quelle fondation, et de pouvoir être réalisés avec une très grande variété de sols.

L'inconvénient majeur des barrages en terre est les infiltrations à travers leurs massifs.

Donc la partie la plus délicate des barrages en terre et en enrochement est l'organe d'étanchéité. Le choix des organes d'étanchéité est l'un des éléments les plus importants du processus de conception et de construction d'un barrage en remblai.

Après le chapitre 2 qui décrit brièvement la localisation et l'hydrologie du barrage étudié "barrage El-Agrem", le chapitre 3 traite en détail les différentes variantes proposées pour assurer l'étanchéité et comment chercher l'organe le plus économique et le plus facile à réaliser.

## **CHAPITRE 2**

### **LOCALISATION ET CARACTERISTIQUES DU BARRAGE ETUDIE**

## 2.1 Localisation

Le barrage d'El Agrem est situé sur la commune de Kaous à 12 Km environ au sud de Jijel au dessus des monts Sidi-Yahia sur l'Oued El Agrem. Ce barrage a été construit dont le but d'assurer l'alimentation en eau d'irrigation des périmètres irrigués situés dans la plaine côtière à l'est de la ville de Jijel (Figure 2.1) [25].



Figure 2.1 : Localisation du barrage El Agrem

## 2.2 Situation général du bassin versant

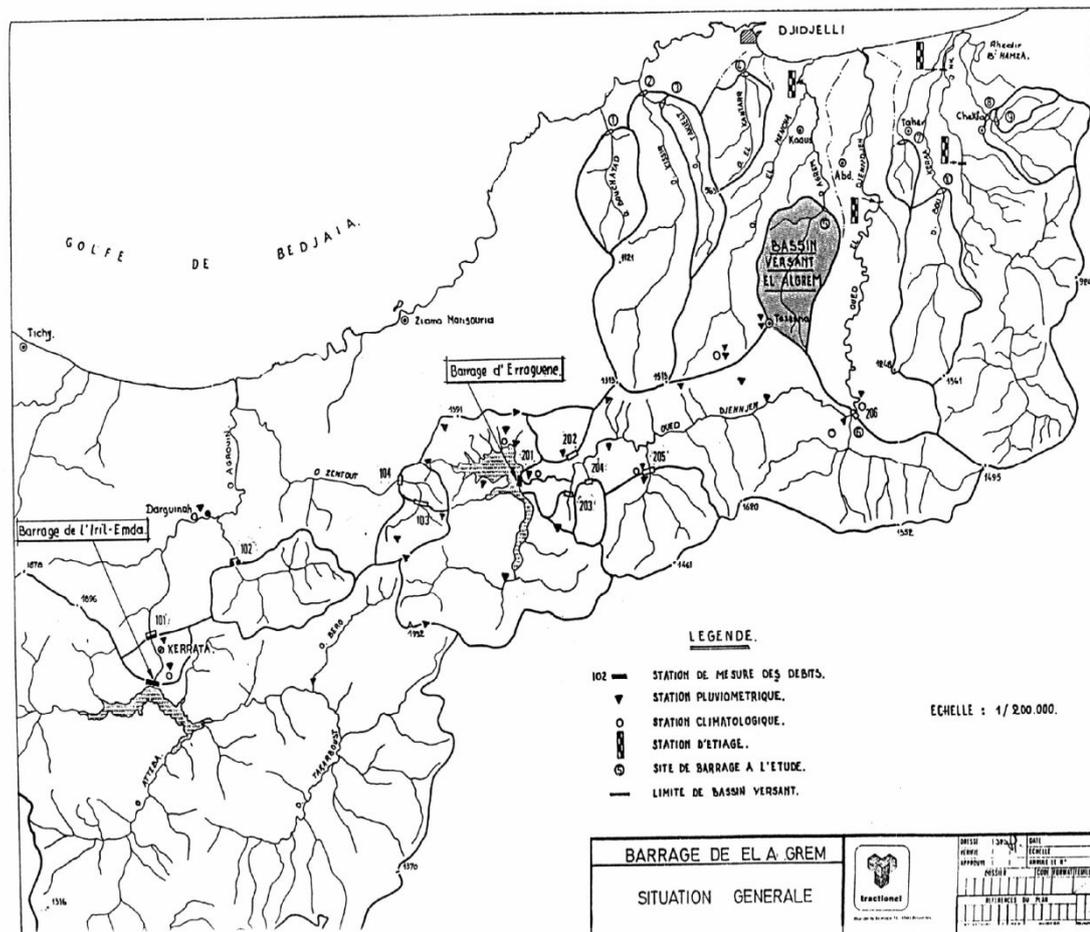
Le bassin versant d'El Agrem situé au nord-est du territoire Algérienne s'étend sur la totalité de la wilaya de Jijel sur une superficie de 39.5 km<sup>2</sup>.

Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, le bassin versant d'El Agrem appartient à l'ensemble de côtier constantinois (Annexe n°6).

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties (fig. 3) :  
- partie orientale avec comme principaux affluents l'oued Merhaba et l'oued Bou Bahri.

- partie occidentale avec comme principaux affluents (oued Tezercourt , oued Harma et l'oued Abima).

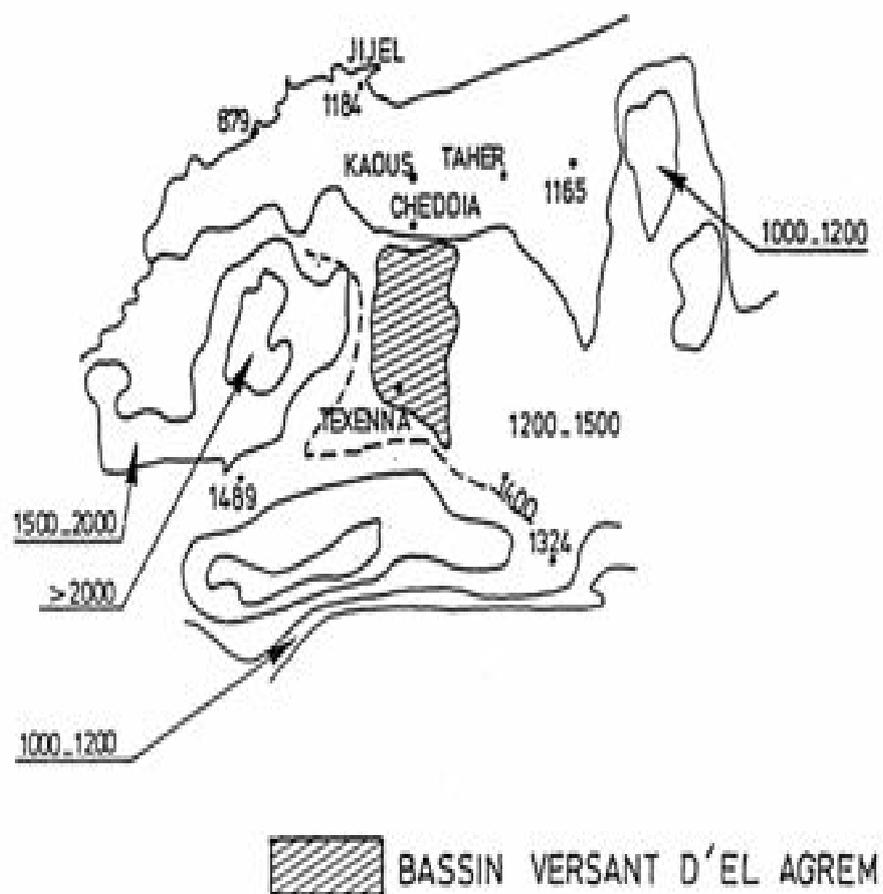
-partie septentrionale : qui débute pratiquement du l'oued El Agrem et s 'étend jusqu'à la mer. L'oued El Mencha est le principal affluent de cette partie.



**Figure 2.2 : Situation général du bassin versant**

### 2.3 Caractéristiques géométriques du Bassin Versant

La superficie du bassin versant est 39.5 km<sup>2</sup> dont 31.5 km<sup>2</sup> du bassin versant sont couverts par des forêts, le bassin versant est presque entièrement situé en montagne son point culminant est à la côte 1489 m et le point le plus bas est à la côte 95m (barrage) l'altitude moyenne du bassin versant est 850 m (Figure 2.2) [25].



**Figure 2.3 : Bassin versant du barrage El Agrem**

## **2.4 Caractéristiques de la retenue**

Capacité brute (Niv.143)	35,8 millions de m <sup>3</sup>
Capacité utile	32,8 millions de m <sup>3</sup>
Volume annuel régularisable	21,5 millions de m <sup>3</sup>
Cote de retenue normale	143
Cote de retenue minimum	108,50

Cote de retenue maximum 145,50

## 2.4.1 Précipitation

- **Données pluviométriques** [25].

Des données sont disponibles à Texenna (61 ans), Djidjelli (30 ans) et Taher (27 ans).

La précipitation moyenne annuelle à Texenna ( $P_{\text{TEX}}$ ) est de 1303 mm.

La précipitation moyenne annuelle sur l'ensemble du bassin versant ( $P_{\text{BV}}$ ) a été estimée à 1225 mm.

La précipitation moyenne annuelle (fourni par l'administration) à Texenna, Djidjelli et Taher détaillée (annexe 03).

## 2.4.2 Les Apports d'El Agrem

### 2.4.2.1 Les Apports Solides

- **L'importance des apports solides**

Les apports solides, dus à l'érosion du bassin versant par les eaux météoriques, sont souvent importants en zone sahélienne et doivent être pris en compte dans les calculs d'ouvrages: ils conditionnent la durée de vie de l'ouvrage et donc son intérêt économique [25].

Les valeurs d'apports solides dépendent de nombreux facteurs, en particulier de la dégradation des sols et du couvert végétal: des valeurs de 1000 t/ km<sup>2</sup>/an dans le nord de la région n'ont rien d'exceptionnel, alors qu'ils peuvent être parfois pratiquement nuls dans le sud [25].

- **Le mécanisme de dépôt des apports solides**

Les apports solides sont constitués d'une part de matériaux sableux ou pierreux qui sont entraînés au fond du cours d'eau et se déposent dès que la vitesse diminue, c'est-à-dire à l'amont de la retenue, et de boues particules très fines en suspension qui au contraire ont tendance à se déposer - aux points bas de la retenue c'est-à-dire à l'aval contre le barrage [25].

La mission a souvent constaté dans les ouvrages anciens cet envasement du fond de la retenue au contact du barrage [25].

#### **2.4.2.2 Les apports liquides**

- l'apport annuel a été fixé à 31 millions de m<sup>3</sup> [25].

#### **2.4.3 Les débits de crue/crue de projet**

Les crues ne sont pas directement proportionnelles à la taille du bassin versant d'autre part qu'il existe une forte diminution des précipitations décennales de 24 heures en débits de crue sont donc proportionnellement moins élevés dans les régions strictement sahéliennes du nord de la zone d'étude que dans celles du sud [25].

La crue de projet est la crue à partir de laquelle l'ouvrage est dimensionné pour une sécurité parfaite de son fonctionnement [21].

Pour les ouvrages les plus courants, on prend en compte une crue de projet centennale. Faute d'observations, on déduit habituellement le débit de crue centennale de celui de la crue décennale par un coefficient multiplicateur qui est de l'ordre de 2 ou 3 pour les régions sahéliennes [25].

On ne doit pas oublier toutefois que les valeurs trouvées ne sont que des ordres de grandeur et la plus grande prudence reste de rigueur [25].

##### **2.4.3.1 Débit de pointe**

Le tableau ci-dessous résume les débits de pointe adoptée pour le barrage El Agrem [25]:

**Tableau 2.1 : les débit de pointe adopté pour le barrage El Agrem**

Période de retour (ans)	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)
10	215
20	250
50	290
100	330
1000	450
10000	675

#### 2.4.3.2 Hydrogramme type

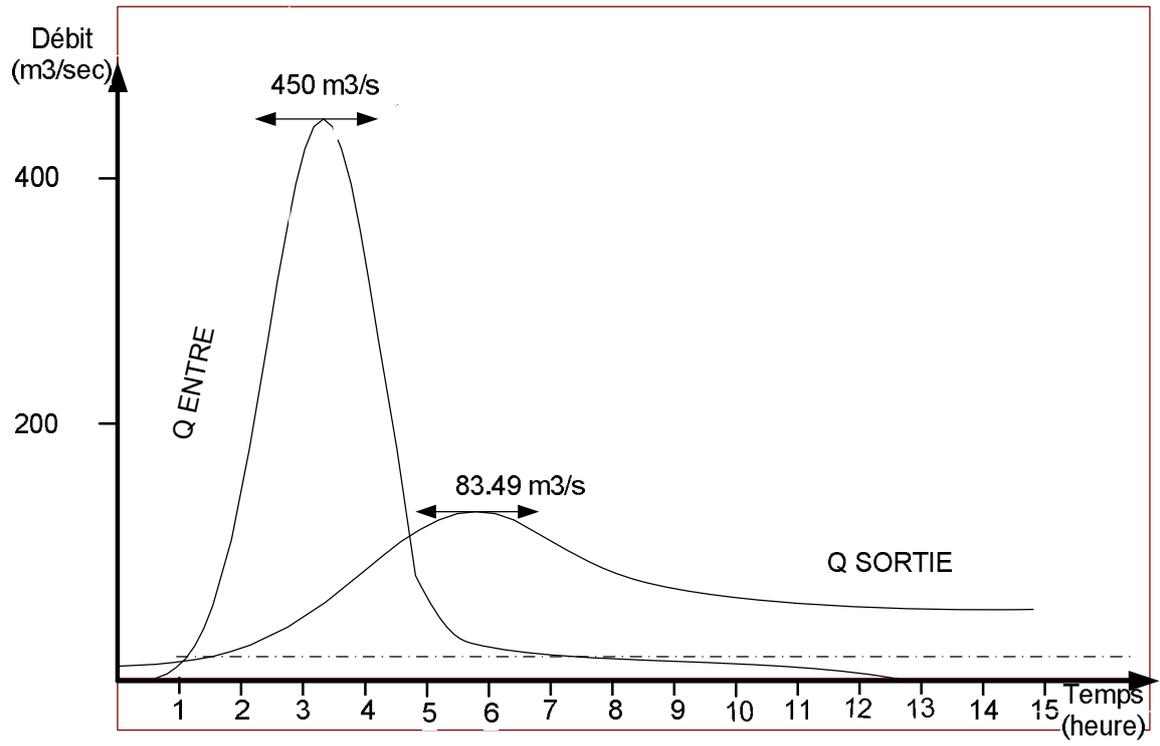
La figure 2.4 ; Donne l'hydrogramme des crues observé à Chaddia pour un  $Q_{\max}$  de 450 m<sup>3</sup>/s, (crue de projet =crue millénaire) [25].

Il présente les caractéristiques suivantes :

-temps de montée T=3h.

-temps de base T=15h.

Le volume de la crue millénaire (450 m<sup>3</sup>/s) est estimé à 6,599 Hm<sup>3</sup> [25].



**Figure 2.4 : Hydrogramme des crues observé à Chaddia**

## 2.5 Caractéristiques de la digue

La digue est constituée d'un massif en remblai compacté de pente moyenne à l'amont et à l'aval de 1,7/1 [25].

La crête de barrage est arasée à la cote 147,00 soit 4 m au-dessus du niveau de la retenue normale et 1,50 m au-dessus du niveau de la crue de projet (niveau 145,50) [25].

Sur la crête, large de 8m, est aménagée une chaussée de 4 m bordée de deux accotements de 1m de large chacun. Cette chaussée n'est destinée qu'à permettre le trafic lié à l'exploitation des ouvrages [25].

La crête, rectiligne, présente une longueur de 435 m [25].

La pente moyenne aval du massif en enrochements est 1,7/1. En fait, la pente du talus est légèrement plus raide, ce qui permet l'installation de risbermes intermédiaires. Celles-ci de 2 m de largeur, sont installées aux niveaux 130 et 120 [25].

L'emprise de la digue dans le fond de la vallée est voisine de 250 m.

La hauteur de la digue est de 63 m au-dessus du lit actuel de l'oued.

La hauteur au-dessus de la fondation est voisine de 70 m.

La digue est essentiellement constituée d'un massif en enrochements granitiques compactés (mise en place en principe par couches de 1 m d'épaisseur). Cette zone constitue la partie la plus importante du volume des remblais [25].

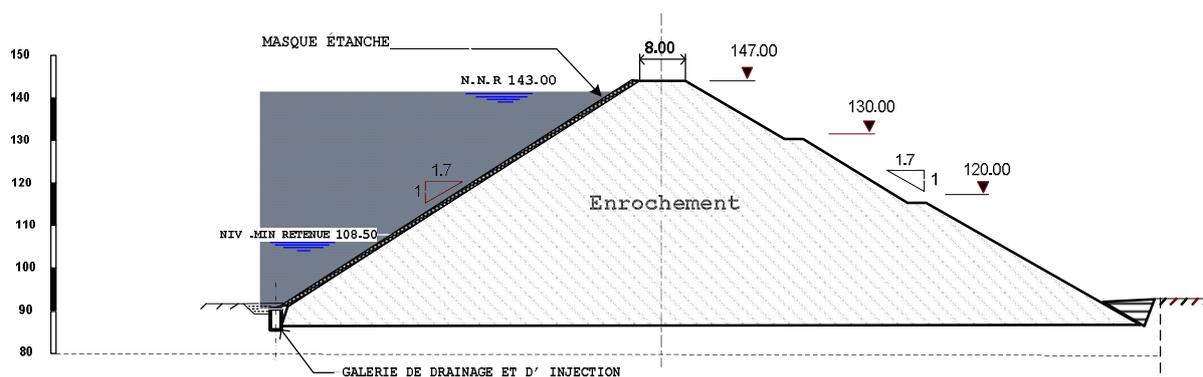


Figure 2.5 : Coupe –Type de la digue

## **2.6 Ouvrages annexes**

### **2.6.1 Dérivation**

Le système complet de dérivation provisoire, implanté dans les granites de la rive droite, a compris d'amont en aval [25]:

Un canal de dérivation de 73 m de longueur dont le radier est à la cote 86, raccordant l'oued à l'entrée de la galerie situé à l'aval du Chabett Mrhara. La réalisation de ce chenal a impliqué une excavation présentant des talus de près de 15 m de hauteur et le détournement du chabett via une tranchée dont les parois étaient bétonnées. Afin d'assurer la stabilité final de l'excavation de la tête amont, un tronçon de 57 m de faux – tunnel a été bétonné dans le chenal amont.

Une galerie souterraine présentant une longueur de 380 m environ.

### **2.6.2 Evacuateur de crues de surface**

#### **2.6.2.1 Options fondamentales**

Pour des raisons de sécurité d'exploitation, un évacuateur à seuil libre a été préféré à tout autre dispositif [25].

L'étude de variantes a montré que les avantages techniques et économiques étaient en faveur d'un déversoir frontal avec coursier à 2 pentes.

L'Evacuateur est installé dans les granits de la rive droite.

#### **2.6.2.2 Dispositions constructives**

L'évacuateur est composé principalement d'amont en aval des ouvrages suivants [25] :

- Plate-forme d'approche,
- Seuil courbe,
- Coursier à deux pentes,
- Cuiller en saut de ski,
- Aire de réception.

### 2.6.2.3 Caractéristiques de l'évacuateur

- **Plate-forme**

Le fond arasé à la cote 137. La limite Est présente un rayon de 25 m et un tronçon amont rectiligne [25].

- **Seuil déversant**

Profil Creager

Longueur 10 m,

Niveau de la crête : 139.

- **Coursier**

Largeur : 20 à 6 m et 6 à 3 m

Tronçon à 22,95 % longueur : 68,86 m,

Tronçon à 11,13% longueur : 71,24 m,

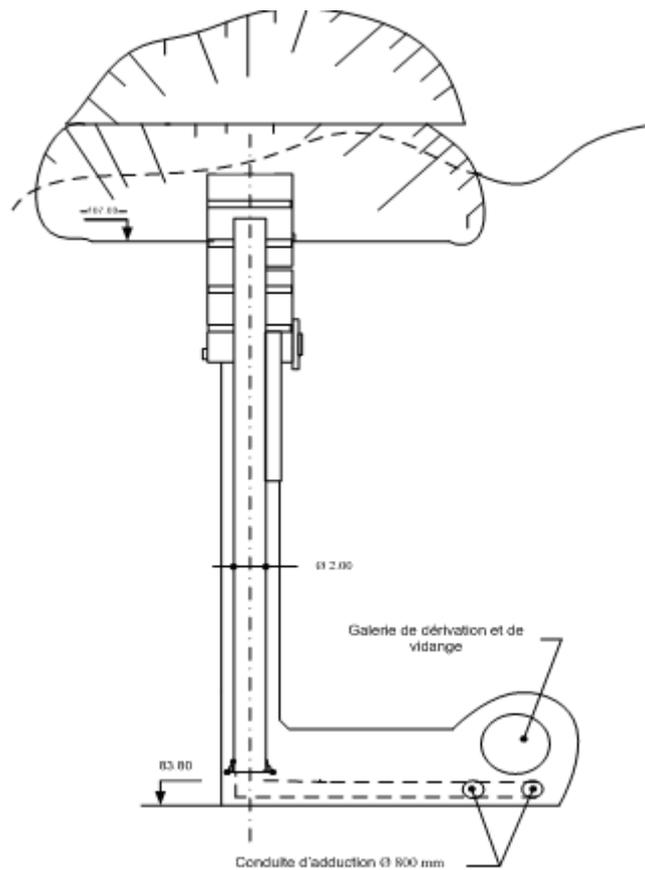
Profil en longs raccordés par rayon vertical 30 m.

La longueur totale de l'ouvrage depuis le seuil jusqu'à l'aval de la cuillère est de 156,50 m.

### 2.6.3 Prise d'eau

La tour est constituée du haut vers le bas [25]:

- D'une coupole circulaire en béton de 4.00 m de diamètre munie de 12 guideaux en béton répartis sur la périphérie. Ceux –ci, qui ont une hauteur de 2,50 m, présentent une section profilée et ménagent entre eux des ouvertures de 0,40 m de largeur.
- D'un fût en béton supportant la coupole. Celui-ci repose au niveau 107 sur la plate-forme rocheuse arasée dans le flanc du versant. il présente une hauteur de 3 m.
- D'un puits circulaire revêtu de béton de 2.00 m de diamètre intérieur et d'une vingtaine de mètre de hauteur (épaisseur 0,35 m).
- A la base du puits, une clôture de bifurcation en acier répartit l'eau entre les deux conduites Ø 800 d'alimentation.
- Un court tronçon de galerie horizontal (l=10 m environ) assure la liaison avec la galerie de dérivation.



**Figure 2.6 : Tour de prise d'eau**

#### 2.6.4 Galerie de vidange de font

La vidange comprend d'amont en aval les principaux ouvrages suivants [25]:

- Les ouvrages amont de la dérivation, c'est à dire :
- Chenal d'entonnement (longueur 16 m).
- Tronçon de faux tunnel longueur 57 m.
- Galerie Ø 4.00 m jusqu'à l'amont de la chambre des vannes souterraine (longueur 161 m).

Le pertuis de vidange situé à la base de la chambre des vannes (longueur total 28 m)

Il équipé d'amont à l'aval des organes de fermeture et de contrôle suivant [25] :

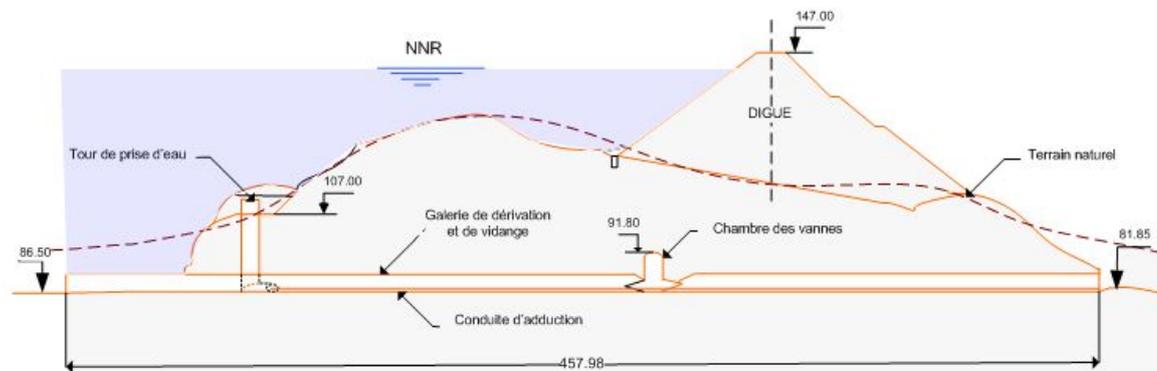
- Une vanne de grand roulant à étanchéité amont (largeur 1,40 m x hauteur 2,50 m).
- Un clapet d'isolation situé à la base du carter de la vanne de garde. Il est destiné à permettre les éventuelles réparations, telles celles du joint d'étanchéité sur la vanne de garde.
- Une vanne de service type vanne segment, (largeur 1,40 m x hauteur 2,20 m).
- Deux canalisations de dévasement Ø 400.

La longueur total du pertuis de vidange qui est blindé est de 28 m ; en ce comprises la zone s'entonnement amont et la zone d'évasement à l'aval des vannes.

La galerie de vidange proprement dite présente un diamètre intérieur de 4.00 m ; la longueur de ce tronçon est de 177,50 m.

Le chenal de restitution à l'oued équipé de sa cuiller de dispersion en saut de ski (longueur 18,50 m).

La longueur de la galerie souterraine est de 423,50 m. la largeur total y compris l'entonnement amont et le canal de restitution aval est de 458 m.



**Figure 2.7 : Conduite de dérivation et de vidange**

## **Conclusion**

Après l'optique de la localisation et les caractéristiques du barrage étudiée, nous allons étudier au chapitre 3 en détail les différentes variantes proposées pour l'étanchéité et comment chercher l'organe le plus économique et le plus facile à réaliser .

En va analyser quatre solutions :

- ⇒ Noyau argileux épais,
- ⇒ Masque en béton bitumineux,
- ⇒ Noyau en béton bitumineux,
- ⇒ Parement en béton,

# CHAPITRE 3

## ETUDE DES VARIANTES

### 3.1 Introduction

Le problème de l'étanchéité du massif se pose chaque fois que le calcul des infiltrations en superstructure indique des pertes admissibles, 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 [4].

Les moyens qu'offre la technique moderne pour se prémunir contre toute infiltration à travers le massif sont nombreux et lorsque nous examinons ce problème nous s'apercevons qu'il existe au moins une bonne solution qui assure l'étanchéité du massif [4].

Tout d'abord nous examinons les différents types d'organes d'étanchéité.

### 3.2 Différents types d'organes d'étanchéité

Lorsque la terre du remblai n'est pas suffisamment imperméable pour constituer un remblai homogène étanche, il faut équiper le barrage d'un organe d'étanchéité spéciale [4].

Les techniques les plus couramment mise en œuvre sont les noyaux en matériaux argileux compactés, en béton bitumineux et les masques amont en béton de ciment ou bitumineux [4].

Il existe néanmoins d'autres techniques telle que : parois moulée, chape et les membranes souples [4].

### 3.2.1 Les barrages à noyau

Le type de noyau recommandé est en argile compacté ou en béton bitumineux. Un noyau d'étanchéité constitué de terres argileuses, d'argile, de terres caillouteuses ou tout autre matériau terreux comportant une forte proportion de matériaux fins lui conférant une faible perméabilité, Lorsque ce matériau est introuvable sur le site, on peut avoir recours à des matériaux de substitution tels qu'une paroi moulée ou bien une superposition de couches de béton bitumineux ou d'asphalte (figure 3.1) [4-2]:

- une recharge amont en matériau drainant assurant la stabilité amont même après une vidange rapide.
- une recharge aval stabilisatrice en matériau peu déformable.
- une protection amont en enrochements, dalles ou autres dispositifs ; un drain interposé entre le noyau et la recharge aval, si celle-ci n'est pas suffisamment perméable, pour évacuer sans pression les écoulements parvenus sur la face aval du noyau.
- des matériaux de transition (filtres) entre ces différents massifs lorsque leurs granulométries respectives le justifient de manière à éviter toute érosion interne par entraînement de particules d'un matériau vers le matériau adjacent.

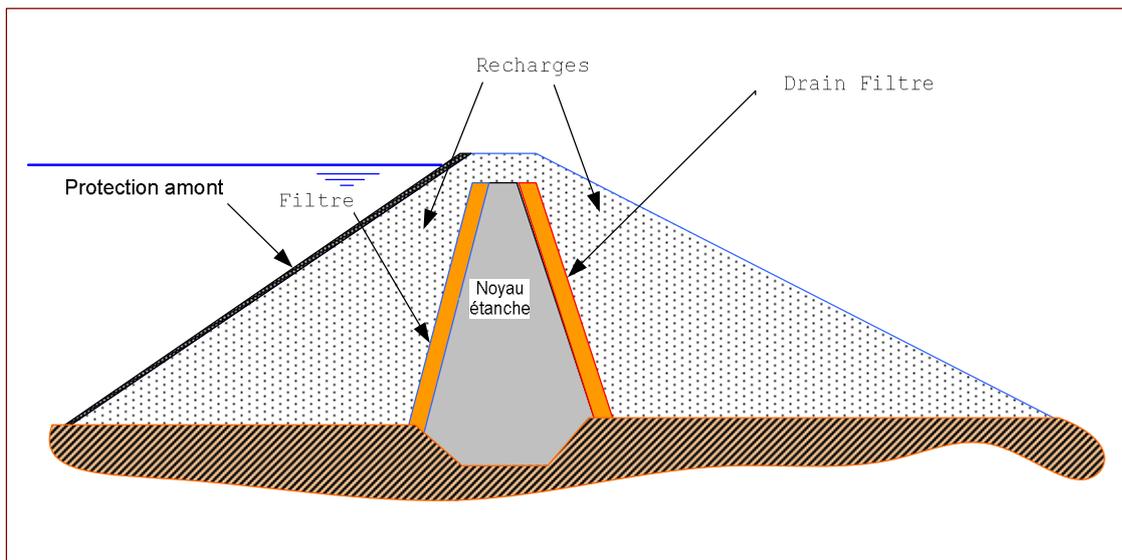


Figure 3.1 : Barrage à noyau

### 3.2.1.1 Noyau argileux compacté

Le noyau argileux compacté disposé verticalement au centre du barrage ou en position inclinée à l'amont de celui-ci, son épaisseur est de l'ordre 1/6 de la hauteur de l'ouvrage [4-2].

Vers le sommet le noyau doit être monté au dessus des plus hautes eaux et pratiquement, compte tenu des remontes capillaires, jusqu'à la tête du barrage [4].

Il doit être protégé de la dessiccation à sa partie supérieure pour éviter toute fissure de retrait qui risquerait de se révéler catastrophique. Cette protection peut être assurée par une couche de sable où de préférence, en traite le sommet du barrage en chemin avec une chaussée enrobée bitumineuse [4].

Latéralement, nous disposons de part et d'autre un drain filtre, vers l'aval pour recueillir les eaux de protection, vers l'amont pour absorber les eaux de ressuyage après la vidange [17].

Vers le bas, il faut assurer la continuité de l'étanchéité en raccordons celle-ci à la fondation imperméable ou au dispositif d'étanchéité des fondation [16].

### 3.2.1.2 Noyau en béton bitumineux

L'étanchement des barrages en terre au moyen de noyau bitumineux a pris une très grande importance dans le monde entier et dans toute les zones climatiques, cet élément d'étanchéité (mieux que les 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 (figure 2.3) [5-6].

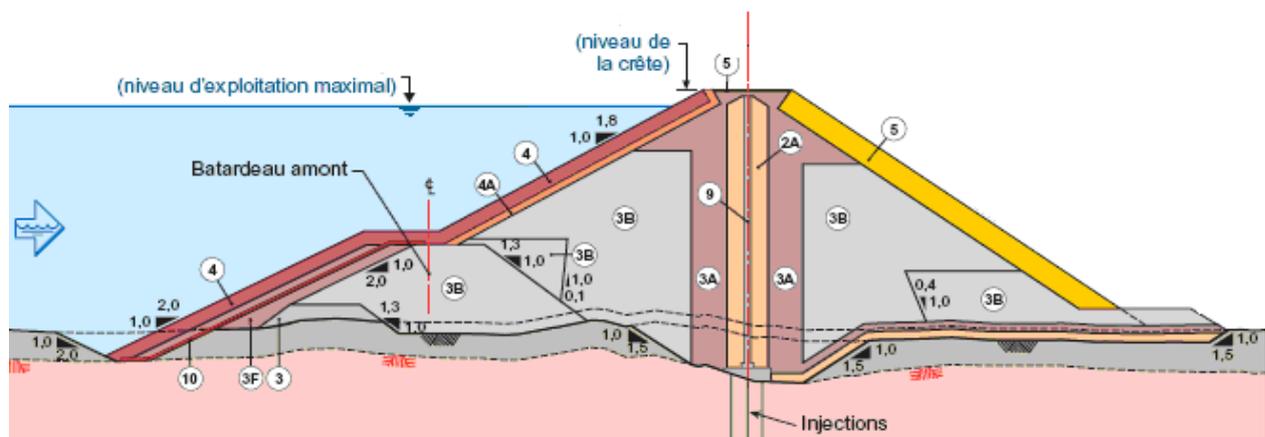


Figure 3.2 : Barrage à noyau de béton bitumineux

Légende :

 2A	Matériau granulaire sélectionné ou traité, compacté (maximum 80 mm)	 9	Membrane géocomposite
 3	Enrochement déversé (maximum 900 mm)	 10	Géotextile
 3A	Enrochement traité ou pierre concassée, compacté (maximum 80 mm)		Mort-terrain
 3B	Enrochement traité ou pierre concassée, compacté (maximum 150 mm)		Roc
 3D	Enrochement sélectionné, compacté (maximum 900 mm)		Béton
 3F	Enrochement traité ou pierre concassée, déversé (maximum 150 mm)	 4A	Enrochement sélectionné
 4	Enrochement sélectionné pour perré, placé	 4B	Enrochement traité, placé

### 3.2.2 Les barrages à masque amont

Les barrages à masque sont constitués d'un remblai plus ou moins perméable assurant la stabilité d'ensemble [9].

Un écran imperméable, appelé masque, est mis en place sur le parement amont de façon à rendre le barrage étanche et lui permettre de retenir l'eau du réservoir [9].

Le masque qui constitue l'organe d'étanchéité amont est classiquement réalisé en béton, avec des produits bitumineux ou encore au moyen d'une géomembrane. Son épaisseur est limitée, ce qui lui permet de s'adapter aux déformations faibles mais inévitables du massif support (les géomembrane peuvent même accepter des déformations importantes) [4-9].

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 rapides [9].

Le corps du barrage assurant la stabilité peut être en matériau quelconque pour autant qu'il soit peu déformable [17].

De nombreux barrages à masque sont réalisés en enrochements. La qualité du compactage lors de la mise en oeuvre du matériau a une grande influence sur les déformations et tassements ultérieurs [2].

Pour améliorer la sécurité du barrage, il n'est pas rare de trouver dans les barrages à masque d'autres matériaux fonctionnels [1-2]:

- 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 drainant, un tapis drainant ou les deux pour évacuer les infiltrations éventuelles à travers le masque.
- des matériaux de protection soit du parement aval (terre végétale engazonnée, enrochements, maçonnerie de pierre sèches, ...) soit du masque d'étanchéité comme des dalles de protection ou des pavés auto-bloquants mettant l'étanchéité mince à l'abri des agressions extérieures telles que la glace, les projectiles ou les chutes de blocs.

Deux exemples de ce type de barrage ont par exemple été construits au Brésil, sur le Rio Pelotas, affluent de l'Uruguay au débit très important [1].

Le barrage de ITA est constitué par un simple tas d'enrochement. Une carrière est réalisée dans la retenue, puis l'enrochement est abattu en carrière pour produire des blocs, dont les plus gros font entre 80 cm et 1 mètre. Ces blocs sont ensuite placés en tas, celui-ci étant juste un peu organisé pour mettre plutôt les blocs les plus fins à l'amont et les autres à l'aval [1].

Le tas d'enrochement une fois terminé, une couche de béton de 40 à 50 cm d'épaisseur, plein d'acier et à joints longitudinaux, est appliqué dessus, c'est ce que l'on appelle le masque [17].

Le béton descend, simplement, dans des goulots à partir du haut, et tout en bas les gens le répartissent latéralement, en couches minces, à l'aide d'une table vibrante.

La largeur des dalles est de 20 ou 25 m ; l'étanchéité entre elles est assurée par des joints en cuivre [1-16].

L'ensemble reste très rustique et peut donc être construit très rapidement.

Les barrages d'une façon générale doivent avoir des technologies simples car ils sont construits à l'extérieur, avec des gens souvent embauchés sur place. Les opérations à accomplir doivent être réduites au plus simple, car c'est la simplicité qui garantit la qualité d'exécution [2-9].

Un autre type de masque peut être appliqué, le masque en béton bitumineux, à l'aspect d'un parking de grande surface. Il est mis en place par les mêmes machines, notamment des finisseurs. La seule différence est que le béton bitumineux est en pente, à environ 2 pour 1 [7].

On peut y marcher mais c'est raide, les moteurs des matériels qui circulent sur le masque – tenus par des treuils en crête du barrage- sont donc basculés car ils n'aiment pas être en pente [7].

Une première couche de béton bitumineux de 10 cm est appliquée, puis deux couches de 5 cm. Bien que cela ressemble à une route, comme il est important que le masque soit étanche, on préfère mettre un peu plus de bitume, plus de matériaux fins, de la farine de roche, de façon à le saturer. Ce béton bitumineux a tendance à «beurrer» et si on faisait ça pour une route elle glisserait énormément. Ce n'est pas tout à fait la même technologie de formulation du béton bitumineux routier, mais c'est la même méthode [2-4].

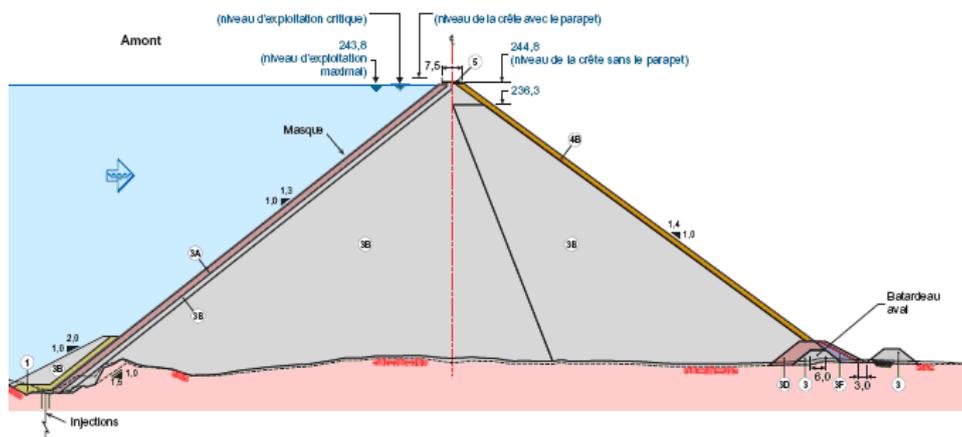


Figure 3.3 : Barrage à masque amont en béton

### Légende :

- 1** Till compacté (maximum 300 mm)
- 2A** Matériau granulaire sélectionné ou traité, compacté (maximum 80 mm)
- 3** Enrochement déversé (maximum 900 mm)
- 3A** Enrochement traité ou pierre concassée, compacté (maximum 80 mm)
- 3B** Enrochement traité ou pierre concassée, compacté (maximum 150 mm)
- 3D** Enrochement sélectionné, compacté (maximum 900 mm)
- 3F** Enrochement traité ou pierre concassée, déversé (maximum 150 mm)
- 5** Pierre concassée ou matériau granulaire concassé, compacté (maximum 31,5 mm, équivalent MG-20b)
- 4B** Enrochement traité, placé (minimum 300 mm, maximum 1 000 mm)

#### 3.2.2.1 Masque en béton de ciment

La dalle doit posséder du joint de construction, du fait du retrait que l'on munit de lame d'étanchéité. Ce joint est respectivement parallèle et perpendiculaires aux lignes de plus grande pente de talus, cette dernière étant nécessaire pour diminuer l'importance des efforts de flexion [4].

### **3.2.2.2 Masque 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 [4].

### **3.2.2.3 Masque en terre**

Au moyen de terre argileux compactée, nous pouvons réaliser une étanchéité convenable, avec des épaisseurs qui sont des caractéristiques de perméabilité du matériau dont on dispose [4].

### **3.2.2.4 Masque en béton bitumineux**

#### **3.2.2.4.1 Historique**

Le béton bitumineux a été très largement employé dans le passé pour assurer l'étanchéité des barrages. Après les matériaux d'une certaine épaisseur (noyau argileux, revêtement en béton de ciment,...) employés dans les techniques traditionnelles d'étanchéité des barrages, divers dispositifs minces ont été utilisés. Ceux-ci sont placés soit sur le parement amont (béton bitumineux, membrane,...) soit dans le corps de la digue (écrans internes en béton bitumineux, parois moulées) [4-9].

Ces procédés sont développés soit pour motifs économiques soit en raison de l'évolution des techniques accompagnées de l'apparition de nouveaux produits possédant de très bonnes qualités d'étanchéité [4-8].

Une des premières utilisations du béton bitumineux pour la construction d'un grand barrage en enrochement a été celle du Ghrib en 1935 [4].

Le barrage du Ghrib est un ouvrage de 72 m de hauteur totale dont 65 m au dessus du talweg [4].

Les talus sont très raides pour un barrage de ce type. Si le fruit aval est de 5/4 le fruit amont qui croit de la base au sommet est compris entre 1/1 et 0.71. le pourcentage de vide du massif est particulièrement réduit puisqu'il n'atteint pas 26%. néanmoins, on a relevé dans l

partie centrale de l'ouvrage des mouvements de l'ordre de 30 cm, résultant du tassement des enrochements sur eux-mêmes et de la compressibilité de la fondation qui s'est traduite par un enfoncement de la digue de 35 cm au cours des 20 premières années après la construction [4].

Le masque est formé d'un tapis de béton bitumineux de 12 cm, réalisé en 2 couches de 6 cm d'épaisseur collées l'une à l'autre et posé sur une couche poreuse de drainage en béton [4].

Ce masque était protégé par un rideau de béton de ciment poreux de 12 cm, armé d'un grillage métallique en acier galvanisé de 6 mm de diamètre [4].

Ce rideau de béton était destiné à assurer la protection thermique et mécanique du masque [4].

En 1953, la corrosion du support métallique entraîne la ruine d'une partie du masque [10].

Les essais effectués à l'occasion de cet incident sur le béton bitumineux ont montré que si la quantité de plasticité et de souplesse du béton s'étaient améliorées, en particulier la cohésion, la dureté et la stabilité aux degrés thermiques élevés [10].

Quant à l'étanchéité elle était demeurée parfaite. Le vieillissement inéluctable d'un masque de barrage ne doit donc pas présenter l'inconvénient s'il est assez lent pour permettre la stabilisation complète du massif qu'il recouvre. Par la suite d'autres barrages ont été réalisés en Algérie [4].

Citons entre autres barrages de Bou Hanifia (1930-1941) de 55 m de hauteur, Iril Emda de 75 m de hauteur, Oued Sarno (1946-1954) de 28 m de hauteur –barrage en terre [4].

A Bou Hanifia, le masque assure sans défaillance son rôle d'étanchéité, mais les dalles de l'avant masque de protection sont rompues horizontalement [4].

A l'oued Sarno, le masque donne entière satisfaction mais la peinture réfléchissante qui constitue la protection thermique doit être refaite [4].

D'une manière générale, on peut donc dire que les difficultés rencontrées en Algérie avec les masques en béton bitumineux ne sont pas liées aux masques proprement dits mais [2]:

- à la conception critiquable du projet (raideur des pentes de la digue, présence et conditions d'accrochage des dalles en béton de protection,...)
- au fait que la technique était il y a 40-50 ans dans une phase de mise en point.
- au problème rencontré avec la couche de peinture protégeant le masque.

Actuellement on peut dire que les matériaux et les techniques de mise en place utilisées permettent d'assurer l'étanchéité des ouvrages dans les meilleures conditions [4].

Les dernier développement dans la mise au point des peinture réfléchissantes (peintre à la base de poudre d'aluminium avec éléments d'accrochage en PVC) permettent d'assurer la bonne tenue dans le temps de la masque .il,'en reste pas mois que des travaux de maintenance locale doivent être envisagés périodiquement durent l'exploitation et qu'à long terme (30 ans environs) [10].

Une réfection plus complète de la peinture de protection du masque ne doit pas être écartée [8-10].

#### **3.2.2.4.2 Evolution des masques en béton bitumineux**

Les premiers exemples (jusqu'à environ 1950) sont fortement inspirés par la construction des routes [2].

Les masques de quelques un 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 en véritable béton bitumineux préparé à chaud, assure 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 [4-7].

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 diverses 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 [4] :

**Type A** : le revêtement consiste en une structure en "Sandwich" comprenant une couche de béton bitumineux drainante comprise entre deux couches de béton bitumineux dense.

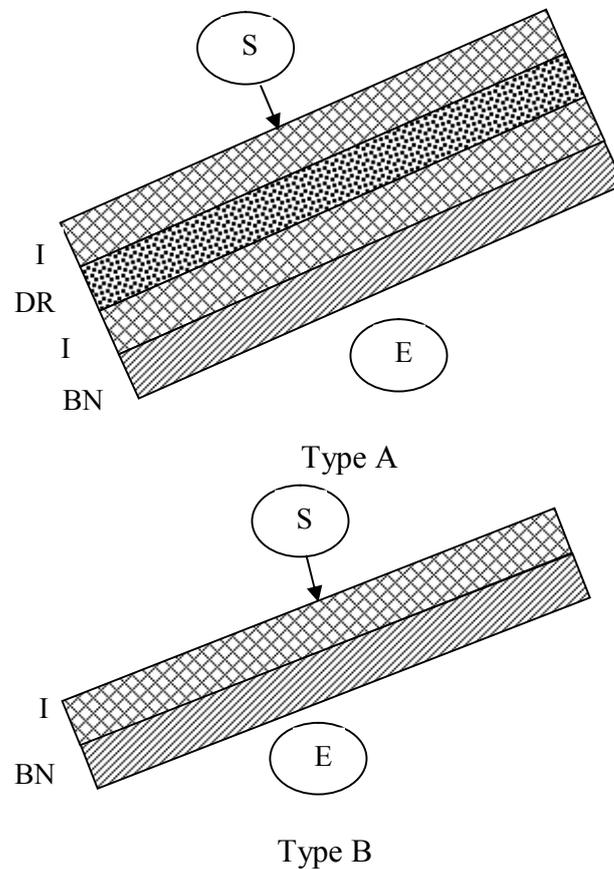
Le revêtement externe est généralement fait en deux couches. Cette structure en "sandwich" est superposée à un drainage en béton bitumineux ouvert ou à une couche de liaison suivant le cas.

Les raisons de ces dispositions, utilisées pour la première fois en 1952 (Genkel, Allemagne) sont la collecte et la mesure des infiltrations. (Figure 3.1).

**Type B** : un drainage en béton bitumineux ouvert et une couche de liaison supporte généralement deux couches de béton bitumineux dense imperméable dont les joints sont alternés.

L'ensemble repose sur une couche de réglage du parement amont (Figure 3.1).

Montgomery (Etats-Unis, 1957) a conçu le premier exemple du type B.



**Figure 3.4 : Types de masque en béton bitumineux.**

- A : Masque bicouche,
- B : Masque monocouche,
- I : Couche imperméable,
- DR : Drainante,
- BN : Couche – support (de liaison),

E : Remblai,

S : Couche de fermeture.

C'est à priori le produit idéal en raison de sa remarquable étanchéité et sa résistance à la flexion [4].

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 [10].

Grosso modo, un béton bitumineux réagit de façon plastique aux déformations lentes, de façon élastique aux déformations rapides, or le tassement s'effectue en générale de façon lente. Egalement, il n'y a pas de problème de joint, les différentes couches de béton bitumineux se soudent littéralement à chaud [8].

### **3.3 Variantes proposées pour l'étanchéité du barrage El-Agrem**

Les techniques les plus couramment utilisées en Algérie sont le noyau en matériaux argileux compacté [2], le masque amont en béton de ciment " le cas du barrage El-Arem"[25].

Dans notre étude nous avons proposé les variantes sélectionner suivantes et montre que le choix de l'organe de l'étanchéité du barrage étudié a été mal fait :

- Incorporation d'un noyau étanche en matériaux argileux à l'intérieur de l'enrochement,
- Masque étanche amont en enrobé de bitume,
- Masque étanche en béton armé.
- Noyau en béton bitumineux.

#### **3.3.1 Barrage à noyau argileux**

##### **3.3.1.1 Conception générale de la digue**

Le site présentant une séismicité assez accusée, il y a lieu d'adopter des dispositions susceptibles de diminuer la sensibilité de l'ouvrage aux secousses sismiques [26].

Les principales précautions prises sont les suivantes :

- Noyau étanche épais, de forme pratiquement symétrique, de façon à disposer à l'amont comme à l'aval d'une forte épaisseur de recharge,
- choix de matériaux de recharge peu sensibles aux sollicitations dynamique.

- disposition à l'amont du noyau d'une épaisse couche de transition aux propriétés autocolmatantes vis-à-vis de celui-ci.
- sélection et classification soignée des matériaux.

La digue est constituée d'un remblai en enrochements compactés de pente moyenne à l'amont de 1,7/1 et à l'aval de 1,7/1, La pente aval est pourvue de risbermes aux niveaux 130 et 120 [26].

A l'amont, le remblai s'appuie contre le batardeau. La crête du barrage est arasée à la cote 147,00, soit 4 m au-dessus du niveau de la retenue normale et 1.50 m au dessus du niveau de la crue de projet (Niveau 145.50) [26].

Sur la crête, large de 8 m, est aménagée une chaussée de 4 m bordée de deux accotements de 1 m de large chacun. Cette chaussée n'est destinée qu'à permettre le trafic lié à l'exploitation des ouvrages [26].

Le batardeau, arasé à la cote 98, 50, fait partie intégrante de la digue et a été implanté de manière à ce que son pied amont corresponde pratiquement au pied amont de la digue [26].

Le batardeau est constitué d'un massif en enrochements avec étanchéité sur le parement amont. Cette solution a été préférée à celle consistant à donner au batardeau un profil de barrage avec noyau argileux central pour des raisons de facilité de mise en œuvre.

Les décapages et excavations prévus sous la digue ont été déterminés sur base de l'ensemble des données géologiques disponibles (sismique, levé de terrain, forages).

Ils sont respectivement [26]:

- en rive gauche : 11 m environ,
- dans le fond de la vallée : 10 m environ,
- en rive droite : 3-5 m.

Une galerie d'injection et de contrôle est prévue à la base du noyau. Elle est encastrée dans le rocher de fondation et présente une section intérieure de 3 m de hauteur et 2 m de large , sa longueur est de 430 m. Cette galerie aura pratiquement les fonctions suivantes [25]:

- permettre une reprise éventuelle des injections ou des drainages de la fondation du barrage.

- abriter les instruments de mesure placés dans le corps du barrage pour son auscultation.
- permettre le contrôle du débit des drains forés éventuellement à partir de la galerie et dont les exutoires se trouvent dans celle-ci.

### 3.3.1.2 Constitution des remblais

Les remblais de la digue sont constitués des matériaux suivants (Figure 3.5) [26]:

- **Zone 1** : Le noyau étanche à une forme pratiquement symétrique, de façon à disposer à l'amont comme à l'aval d'une forte épaisseur de recharge, Il est constitué de silts, son volume est de 0,5 million m<sup>3</sup>.

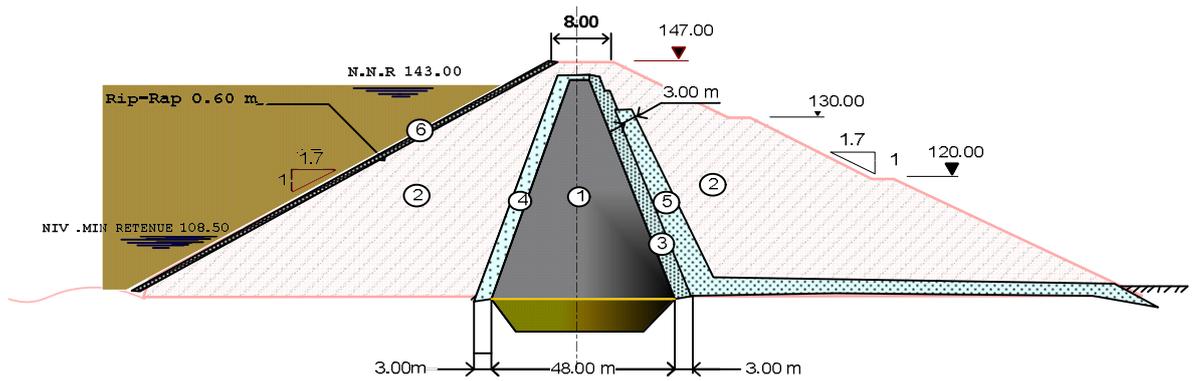
Le noyau est arasé à la cote 145 où sa largeur est de 6 m. En dessous de 145, les pentes des talus amont et aval sont de 1/0,3 jusqu'au niveau des fouilles courantes du barrage.

A ce niveau, le noyau présente une largeur de 48 m. Sur toute sa hauteur, le noyau est en contact vers l'amont avec une zone de transition qui présente des caractéristiques auto-colmatantes et vers l'aval avec un filtre.

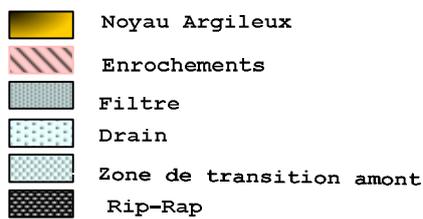
- **Zone 2** : recharges principales amont et aval en enrochements compactés et batardeau.
- **Zone 3** : constitue le filtre aval en contact direct avec le noyau il répond à la double fonction de filtre vis-à-vis des particules fines du noyau et du drain, de façon à créer le rabattement de la surface piézométrique .
- **Zone 4** : constitue la zone de transition amont (largeur 3 m).

Celle-ci est constituée d'un matériau auto colmatant vis-à-vis du noyau.

- **Zone 5** : zone de transition aval au contact entre la fondation et les enrochements éventuelle).
- **Zone 6** : rip-rap de protection du parement amont.



**Figure 3.5: Barrage à noyau argileux « coupe-type de la digue »**



### 3.3.2 Barrage à masque amont en béton bitumineux

#### 3.3.2.1 Conception générale de la digue

La digue est constituée d'un massif en enrochements compactés, l'étanchéité étant assurée sur le parement amont par un masque bitumineux étanche [26].

Les caractéristiques géométriques de la digue sont les mêmes que celles des autres variantes [26].

Le batardeau cependant ne pouvant être inclus dans le corps de la digue vu la nécessité de mettre en place le masque d'étanchéité, a dû être reporté à l'amont de la digue [26].

Cette disposition entraîne un allongement des galeries de dérivation et de vidange [26].

### 3.3.2.2 Description du masque en béton bitumineux

Le revêtement d'étanchéité consiste en principe en une ou plusieurs couches de béton bitumineux dont le nombre et l'épaisseur totale est fixée de manière à répondre aux garanties d'étanchéité qui lui sont imposées [26].

Elles sont appuyées sur une couche d'enrochements sélectionnés (Roche concassées 0-50) de 0.5 m d'épaisseur. Le masque se raccorde à la parafouille de béton qui joue également le rôle de galerie d'injection et de contrôle. Celle-ci est fondée directement au rocher [26].

La hauteur de la digue au dessus du rocher étant faible au voisinage de la galerie, les tassements à redouter sont donc limités, ce qui diminue le risque de cisaillement du masque amont dans la zone où il quitte le béton pour s'appuyer sur la digue .

Deux types de masque peuvent être considérés [26] :

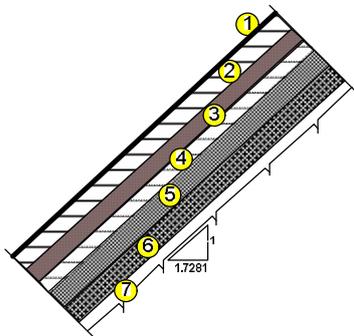
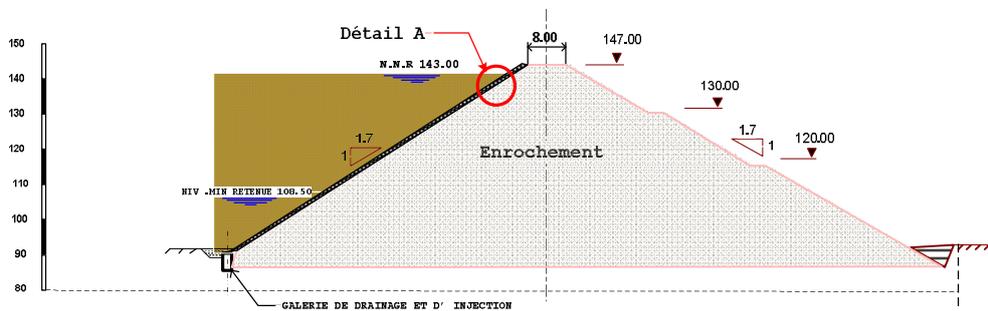
- Le revêtement type " sandwich ", comprenant une couche bitumineuse compris entre deux couches bitumineuses étanches,
- Le revêtement comportant une seule barrière bitumineuse étanche, monocouche ou bicouche, reposant en général sur une couche drainant en enrobés ouverts.

Le revêtement d'étanchéité doit présenter et conserver dans le temps ses qualités et résister aux différentes sollicitations qu'il est appelé à subir, à savoir [11]:

- Vieillissement,
- Exposition des talus avec ce que cela implique au point de vue action des rayons solaires ( ultraviolets) et effet des température de l'air extérieur,
- Affaissements locaux possibles du support quelle qu'en soit la cause ; séisme, hétérogénéité des remblais mis en digue, défauts éventuelles de compactage,...).
- Attaque par la végétation qui pourrait avoir tendance à reprendre vie.

Tenant compte de l'ensemble de ces considération, le masque prévu comporte successivement, de la surface vers le bas comme représente sur la coupe type ci dessous (Figure 3.5) [26] :

1. Une protection solaire climatique type " mastix " (1.5 kg/m<sup>2</sup>),
2. 12 cm de béton asphaltique étanche,
3. 8 cm de drain bitumineux,
4. 6 cm de béton asphaltique étanche,
5. Couche de liaison (90 kg/m<sup>2</sup>),
6. Couche d'imprégnation 2 kg/m<sup>2</sup>
7. Zone de transition en roche concassés (0-90) mm, épaisseur 0.60 m.



1. Une protection solaire climatique type " mastix " (1.5 kg/m<sup>2</sup>),
2. 12 cm de béton asphaltique étanche,
3. 8 cm de drain bitumineux,
4. 6 cm de béton asphaltique étanche,
5. couche de liaison (90 kg/m<sup>2</sup>),
6. couche d'imprégnation 2 kg/m<sup>2</sup>
7. zone de transition en roche concassés (0-90) mm, épaisseur 0.60 m.

**Figure 3.6 : Coupe –type « Masque en béton bitumineux »**

Le masque est limité à sa partie supérieure par un parevagues réalisé en éléments de béton préfabriqués. Celui-ci, combiné avec le revêtement de la route de crête, permet d'éviter les infiltrations d'eau derrière le masque étanche [26].

Le revêtement devra conserver dans le temps les qualités nécessaires pour respecter les pertes maximales tolérées suivantes [26]:

- perte totale pour l'ensemble du masque : 5lt/sec
- perte maximal par panneau vertical de 10m de largeur : 2lt/sec.

L'existence d'une galerie de pied est pratiquement indispensable pour la collecte, l'inspection et l'évacuation des eaux de percolation, surtout dans le cas du revêtement type " Sandwich". Elle permet par ailleurs [25-26]:

- de vérifier le comportement du pied du barrage,
- d'abriter des instruments de contrôle (par exemple : piézomètres, drains de fondation,.....),
- de permettre une reprise éventuelle d'injection dans l'écran principal.

Les drainages sont disposés de manière à pouvoir distinguer les fuites du masque étanche de celles provenant d'une autre origine [26].

A cet effet, la division du masque en panneaux permet de répéter les fuites éventuelles et de localiser, en vue de leur traitement, les défauts éventuels d'étanchéité du masque étanche [26].

### **3.3.3 Barrage à masque amont en béton de ciment**

#### **3.3.3.1 Généralités**

Pour fractionner l'exécution du voile et pour lui donner des possibilités de déformation, il est réalisé par un assemblage de dalles indépendantes coulées sur l'enrochement. Une lame d'étanchéité en caoutchouc est interposée entre les dalles [26].

Le masque en béton pénètre dans le rocher de fondation par l'intermédiaire d'un mur et parafouille [26].

#### **3.3.3.2 Description du masque**

- L'épaisseur des dalles varie de 0.60 m au fond de la retenue à 0.30 m en crête.
- La dimension maximale des dalles est de 13.60 m x 14.00.

L'élévation amont montre le découpage des joints. Un joint parallèle à la parafouille forme une rangée de dalles de 4 m de largeur dites " dalles périmétrales ", dont le but est d'augmenter la souplesse du masque au voisinage des appuis [26].

Les joints ont une ouverture de 12 mm, ménagée par un coffrage perdu en matériau compressible et imputrescible [26].

Les dalles sont mises en œuvre directement sur l'enrochement de transition, sans interposition d'un béton de réglage. Les dalles sont donc accrochées à l'enrochement : ainsi, les dalles inférieures ne sont pas sollicitées par celles situées au-dessus d'elles [26].

Avant bétonnage des dalles, il est prévu de réaliser sur la surface du parement au droit des joints, sur une largeur minimale de 50 cm, une nervure flanc de béton. Le but en est triple [25] :

- Faciliter le réglage du coffrage,
- Désolidariser sur leur pourtour les dalles de leur support, afin de réduire le risque de fissuration au voisinage des abouts en cas de mouvement relatif de la dalle par rapport aux enrochements,
- Éviter les pertes de laitance dans les enrochements et garantir ainsi la qualité du béton et le bon enrobage des lames d'étanchéité.

Les lames d'étanchéité sont en caoutchouc. Des pièces d'intersection spéciales en T et en croix sont prévues [25].

Les dalles sont armées. Les armatures sont concentrées en une seule nappe formant quadrillage, située au milieu de la dalle, de façon à être bien protégée en cas d'épaufrage du béton et surtout pour donner plus de souplesse aux dalles [25].

Le ferrailage des dalles périmétrales est renforcé car c'est en ces endroits que se sont produits la plupart des incidents sur les barrages de ce type.

Un ferrailage spécial est prévu aux extrémités des dalles, de façon à éviter la fissuration du béton près de la lame d'étanchéité.

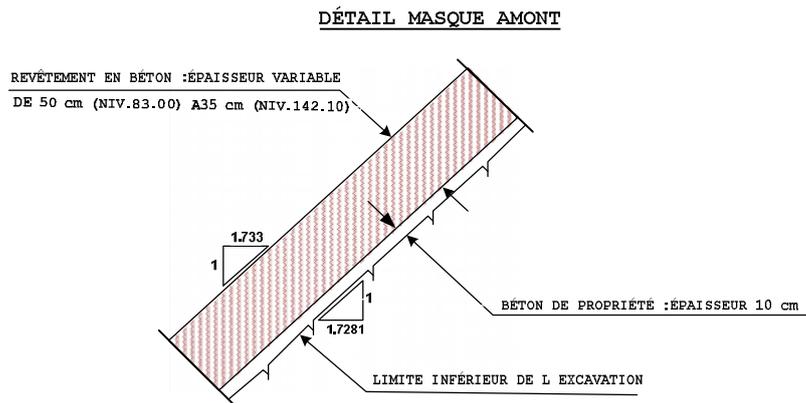
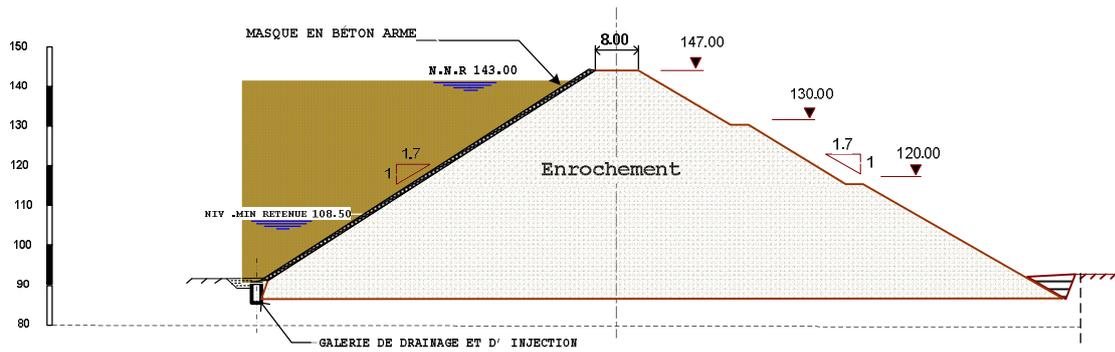


Figure 3.7 : Coupe-type « digue en béton de ciment »

### 3.3.4 Barrage à noyau central bitumineux

#### 3.3.4.1 Description du barrage à noyau central bitumineux

Le massif d'enrochements est muni dans son plan axial d'un noyau vertical en béton bitumineux [26].

Pour un noyau bitumineux, les conditions d'étanchéité sont semblables à celles du masque d'étanchéité en ce qui concerne le matériau utilisé. Des différences résultent cependant du fait que le masque d'étanchéité bitumineux est réalisé après exécution des travaux de remblai, tandis que l'écran d'étanchéité bitumineux intérieur doit être mis en place en même temps que le remblai et doit suivre les déformations de celui-ci [26].

L'élément étanche est constitué par un noyau bitumineux situé sous la crête de la digue. La partie inférieure du noyau est verticale jusqu'au niveau 125 et présente une épaisseur de 80 cm, la partie supérieure est inclinée vers l'aval à 1/4 et présente une épaisseur de 60 cm [26].

A sa base, le noyau s'appuie sur une galerie d'injection et de contrôle des fuites qui remplissent les mêmes fonctions que la galerie de la variante à masque étanche.

De part et d'autre du noyau, une zone de transition est prévue en matériaux 10-80 mm [26].

La zone de transition amont est destinée à fournir les éléments fins susceptibles de colmater les fissures qui pourraient se produire dans le noyau suite à un déchirement local. Au travers de cette zone, des injections peuvent également être pratiquées pour colmater des fuites éventuelles [2].

La zone aval sert également de drain permettant de localiser les fuites éventuelles. Par ailleurs, ces zones de transition sont mises en place soit en même temps que le noyau qui est compacté avec ces zones, soit immédiatement après extraction d'un coffrage glissant [26].

Par suite de leur incorporation dans le massif du barrages et de la faible surface exposée lors de l'exécution, comparativement à celle d'un masque d'étanchéité externe, jointe à la capacité calorifique élevée du matériau bitumineux, les travaux dépendent peu des conditions de client [25].

A El Agrem, cet avantage a cependant moins d'importance, car le masque étanche externe peut être réalisé en 6 mois, c'est-à-dire durant la saison sèche [25].

Le profil du barrage est le même que celui retenu pour la solution à noyau argileux [26].

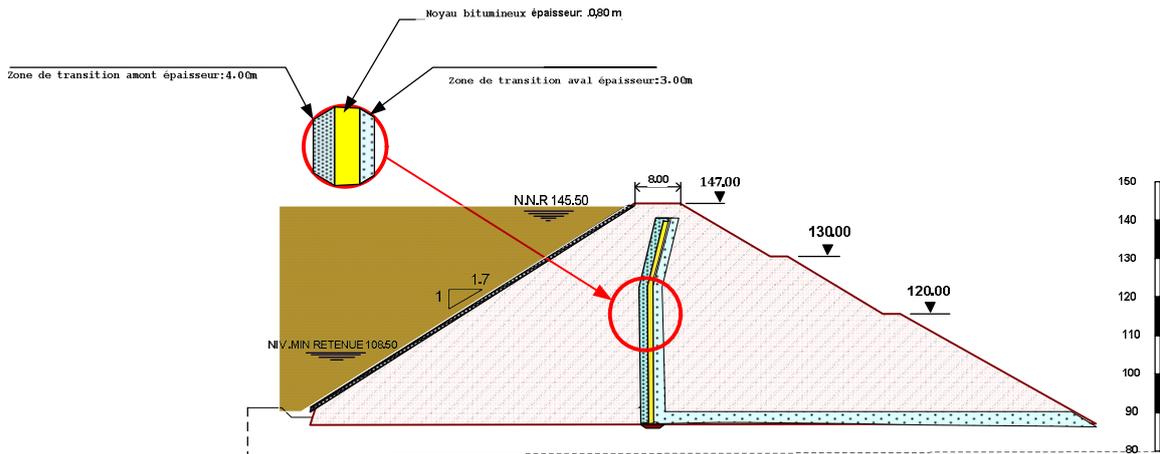


Figure 3.8 : Coupe-type « Barrage à noyau en béton bitumineux »

**LÉGENDE**

-  Noyau bitumineux
-  Enrochements
-  Drain
-  Zone de transition amont
-  Rip-Rap

### 3.4 Etude technico-économique

Le choix entre un tel ou un tel organe nécessite une étude technico-économique [4].

#### 3.4.1 Perspective technique

Un masque en béton bitumineux, adopté comme barrière étanche sur barrage en terre, est souvent compétitif, sur le plan technique, par rapport à d'autres dispositifs plus classiques, tels que noyau en terre, ou d'autres solutions de remplacement comme un masque en béton armé, ou un écran interne d'étanchéité en béton bitumineux [4-5].

- Par rapport à un noyau en terre ou à un écran interne d'étanchéité en terre ou en béton bitumineux, 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.
- Un autre avantage offert par le masque amont en béton bitumineux est que, le masque est réalisé après exécution des travaux de remblai, tandis que le noyau en terre et

l'écran d'étanchéité en béton bitumineux doivent être mis en place en même temps que le remblai et doivent suivre les déformations de celui-ci.

- En cas de défaillance, le masque en béton bitumineux sera facilement réparé par rapport au noyau en terre ou un écran interne d'étanchéité en béton bitumineux.
- Par rapport à un masque 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 de l'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.
- Les remblais à grains grossiers, bien compactés, fournissent un excellent support aux masques en béton bitumineux. Les mêmes masques placés sur des remblais bien compactés en matériaux compressibles, présentent également un bon comportement dans le temps.
- Les méthodes de constructions modernes et la conception actuelle de la composition des enrobés permettent la mise en place des 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.

### **3.4.2 Perspective économique**

En comparant le prix de revient d'un masque en béton bitumineux à celui d'une étanchéité amont traitée en dalles en béton armé, nous constatons que pour des surfaces à traiter de l'ordre de 15 à 20000 m<sup>2</sup> (h=60 m) le prix du masque en béton bitumineux (binder + 2 couches de 6 cm) est environ 6 fois moins cher que celui d'un masque en béton armé [4].

### 3.4.3 Comparaison économique

Les résultats de cette comparaison sont examinés en détail (annexe N°05).

A l'établissement de cette comparaison, les différents éléments de la composant ont fait l'objet d'études des variantes. Ces variantes ont concerné le barrage :

- Digue à noyau argileux : **237.940.000,00 DA**
- Digue à masque étanche en béton bitumineux : **88.065.000 ,00 DA**
- Digue à noyau en béton bitumineux : **571.200.000,00 DA**
- Digue à parement en béton armé : **122.868.000,00 DA**

### 3.4.4 Estimation Global

#### 3.4.4.1 Résumé des comparaisons économiques

Le Tableau ci-après résume le coût de chaque solution.

Les écarts en pourcentage sont donnés par rapport à la solution à masque étanche en béton bitumineux prise initialement comme solution de référence.

**Tableau 3.2 : Comparaison économique des variantes**

Type barrage	Montant en 10 <sup>8</sup> DA	%
<b>1. Noyau argileux</b>	<b>1,23</b>	<b>+39,78</b>
<b>2. Masque étanche en béton bitumineux</b>	<b>0,88</b>	<b>0.00</b>
<b>3. Parement en béton</b>	<b>5,71</b>	<b>+548,88</b>
<b>4. Noyau en béton bitumineux</b>	<b>2,38</b>	<b>+170,46</b>

### **3.5 Classification des différentes variantes**

Compte tenu des conditions du site d'El-Agrem, on peut faire la classification des différentes variantes selon les critères suivants :

#### **3.5.1 Adaptation au site**

Vu la structure géologique du site caractérisée par le contact brutal entre marnes en rive gauche et granit en rive droite, un comportement différentiel des terrains de fondation est à craindre [25].

L'orientation de ce contact, perpendiculaire aux dispositifs d'étanchéité, fait préférer les solutions du type " barrage souple ", qui s'adaptent sans fissuration aux déformations, et les étanchéités à gradient hydraulique relativement réduit, qui permettent d'"étanchéité" les fuites éventuellement et de réaliser des systèmes aux propriétés autocolmatantes [25].

A cet égard, les barrages à noyau argileux épais sont préférables, Les risques de fissuration dans la partie haute du noyau sont plus grands et il faut conditionner les filtres amont, de façon à ce qu'ils présentent de réelles propriétés autocolmatantes [12].

La solution à parement en béton est à cet égard la moins favorable malgré les dispositions prises dans la conception de l'étanchéité ( dalles périmétrales , joints entre panneaux, multiplication des articulations, compactage très soigné des enrochements) [25].

Les solutions à étanchéités asphaltiques sont comparables, avec cependant un avantage pour le masque amont, du fait de la possibilité de réparation après vidange [8].

#### **3.5.2 Séismicité**

Le site présente des risques sismiques relativement élevés, comme signalé par ailleurs. Il est donc indispensable de se prémunir contre tout désordre majeur qui pourrait affecter l'organe d'étanchéité du barrage du fait d'un tremblement de terre[25].

Les ouvrages à noyau argileux épais présentent les meilleures garanties à cet égard [2].

Les dispositions prises avec la solution masque asphaltique étanche à l'amont, du type sandwich, présentent un comportement au séisme très satisfaisant, la facilité d'intervention directe sur le parement plaide également en faveur de cette solution[8].

Les deux autres solutions sont équivalentes, la raideur du parement amont étant partiellement compensée par la possibilité d'intervention directe.

Il ne semble pas néanmoins qu'il existe d'exemple caractérisé de désordres majeurs survenus dans ce type de barrage à la suite de séisme.

### **3.5.3 Disponibilité des matériaux**

Comme signalé par ailleurs, le nœud du problème des solutions à noyau argileux est constitué par la quantité de matériau à noyau (silt argileux) économiquement exploitable [2].

Il semble que la solution à noyau argileux nécessitent un demi million de m<sup>3</sup> de silts doit être écartée. La collecte de ce volume de matériaux et son exploitation dans un grand nombre de gîtes disséminés en amont et en aval de la digue ne constituent une solution intéressante [2]:

- Ni d'un point de vue économique (augmentation de la quantité de matériaux indésirables, multiplication des voies d'accès,...).
- Ni du point de vue délais (influence des conditions météorologiques,..)
- Ni du point de vue qualité et homogénéité du noyau.

Par contre, la solution à noyau en béton bitumineux permet de réduire ces inconvénients sous réserve de confirmation des quantités disponibles.

Il n'en reste pas moins que de ce point de vue, la solution à masque étanche en béton bitumineux est la plus favorable puisqu'elle fait appel uniquement aux matériaux disponibles sur le site, les enrochements étant exploités à proximité du chantier et convenant comme agrégats à béton de qualité.

### 3.5.4 Difficulté de réalisation

La solution avec noyau argileux épais est la plus courante et la plus avantageuse quoiqu'elle demande plus de soins aux niveaux de la réalisation des transitions et filtres et une surveillance plus draconienne lors de la mise en place du noyau [21].

La bonne tenue du parement en béton (conception des joints et des reprises, technologie soignée, sans interruption de la coulée, homogénéité du béton), que par la faible déformabilité résiduelle des enrochements [21].

En particulier, il est primordial que les tassements inévitables lors de la mise en eau soient réduits, ce qui implique une conception spéciale des remblais, associée à une mise en œuvre très soignée des enrochements, en particulier de leur mise en place et du compactage de la couche qui reçoit directement le parement [2].

Les solutions à organe d'étanchéité bituminé font appel à une technologie minutieuse qui est universellement reconnue [11].

Il est donc impératif d'associer l'une d'entre elles à la réalisation de l'ouvrage.

### 3.5.5 Coût

Cet aspect a été examiné en détail (Annexe 1).

La solution la plus intéressante est celle à masque étanche en béton bitumineux.

### 3.5.6 Délai de réalisation

Les cadences mensuelles de mise en remblai peuvent être estimées comme suite (Tableau N°3.3).

**Tableau 3.3: Cadences mensuelles de mise en remblai**

Désignation	mois	Volume (m <sup>3</sup> )
Noyau argileux	18	475.880
Masque étanche en béton bitumineux	8	9.785
Parement en béton de ciment	12	16.320
Noyau en béton bitumineux	15	13.652

### 3.5.7 Résumé de la classification des variantes

Le classement des différentes variantes selon l'adaptation du site, la sismicité, la disponibilité des matériaux, du coût, du délai de réalisation et les difficultés de réalisation résulte que la solution du masque en béton bitumineux présente le plus d'avantages (Tableau 3.4).

**Tableau 3.4 : Classification des variantes**

Désignation	Adaptation au site	Séismicité	Disponibilité des matériaux	Coût	Délai de réalisation	Difficultés de réalisation
Noyau argileux	2	1	4	2	4	1
Masque en béton bitumineux	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Parement en béton	4	4	3	4	2	3
Noyau en béton bitumineux	3	3	2	3	3	4

## Conclusion

D'après les comparaisons faites basées sur perspectives économiques et techniques, le masque en béton bitumineux est le plus économique et le plus facile à réaliser.

Le problème majeur de ce type de masque est la maîtrise de la température maximale sur la surface due au rayonnement solaire [24].

La méthode de calcul développée est particulièrement intéressante pour l'évaluation de la température maximale sur la surface et à différentes profondeurs des masques et autres écrans en béton bitumineux [27].

Le chapitre suivant prend cette remarque en considération

# CHAPITRE 4

## ETUDE DE LA REPARTITION DE LA TEMPERATURE SUR LA SURFACE DU MASQUE

### 4.1 Introduction

La stabilité de la couche bitumineuse est étroitement liée à sa résistance aux efforts de cisaillement dépendants de la valeur maximale de la température atteinte par cette couche utilisée comme masque d'étanchéité amont [4].

La valeur maximale de la température de la couche bitumineuse à la surface et à différentes profondeurs, a été déterminée en moyennant un modèle physico-mathématique basé sur l'équation du bilan énergétique appliqué à la couche, sous conditions météorologiques [4].

Le modèle élaboré dans ce contexte est calé par une confrontation de résultats obtenus avec les valeurs réelles mesurées in-situ par EDF de la répartition de la température sur la couche bitumineuse et à différentes profondeurs du masque d'étanchéité du barrage Ghrib [27].

Le modèle utilisé peut prévoir la répartition de la température du masque et permet de se prononcer sur la stabilité de la couche bitumineuse sans effectuer de mesures [27].

## 4.2 Données angulaires, géographiques et géométriques

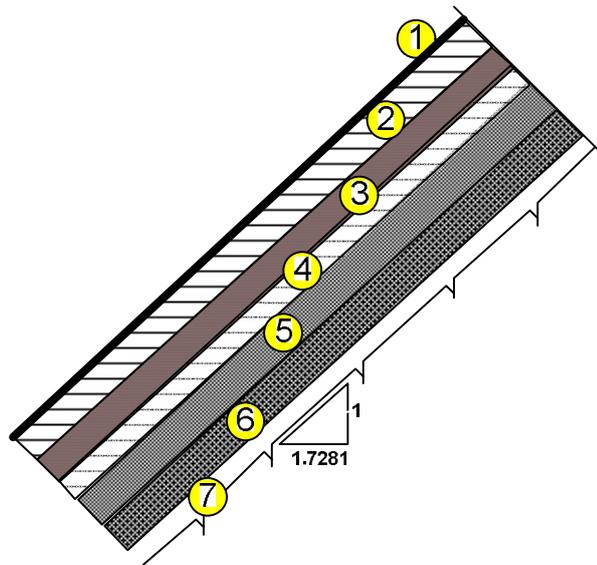
- Angle du talus " $\alpha$ " =  $40^\circ$ ,
- Déclinaison solaire " $\delta$ " =  $9,9^\circ$ ,
- Angle azimutal " $\alpha_F$ " =  $0^\circ$ ,
- Latitude " $\phi$ " =  $36,25^\circ$ ,
- Altitude " $h$ " = 95 m,
- Pression atmosphérique au niveau de la mer " $P_0$ " = 10,33 mbar,
- Pression atmosphérique du site étudié " $P$ " = 9,79 mbar,
- Rapport des pressions " $P/P_0$ " = 0,95,
- Facteur de trouble " $T$ " = 3,5,
- Facteur dépendant de la couleur " $\varepsilon$ " = 1,0 (couleur noire),
- Facteur de réflexion de la zone cultivée " $r_u$ " = 0,1 (pris entre 0,1 et 0,2),
- Facteur de réflexion du masque " $r_o$ " = 0,05 (béton bitumineux).

## 4.3 Détail du masque du barrage "El Agrem"

Le revêtement d'étanchéité consiste en principe en une ou plusieurs couches de béton bitumineux dont le nombre et l'épaisseur totale est fixée de manière à répondre aux garanties d'étanchéité qui lui sont imposées.

Elles sont appuyées sur une couche d'enrochements sélectionnés (Roche concassées 0-50) de 0.5 m d'épaisseur. Le masque se raccorde au para fouille de béton qui joue également le rôle de galerie d'injection et de contrôle. Celle-ci est fondée directement au rocher. Tenant compte de l'ensemble de ces considérations, le masque prévu comporte successivement, de la surface vers le bas comme représente sur la coupe type ci dessous (Figure 4.1) :

8. Une protection solaire climatique type " mastix " ( $1.5 \text{ kg/m}^2$ ),
9. 12 cm de béton asphaltique étanche,
10. 8 cm de drain bitumineux,
11. 6 cm de béton asphaltique étanche,
12. Couche de liaison ( $90 \text{ kg/m}^2$ ),
13. Couche d'imprégnation  $2 \text{ kg/m}^2$
14. Zone de transition en roche concassés (0-90) mm, épaisseur 0.60 m.



**Figure 4.1 : Coupe du masque bitumineux**

#### **4.4 Rayonnement solaire au sol et rayonnement terrestre**

L'enveloppe gazeuse plus ou moins riche en vapeur d'eau, que constitue l'atmosphère s'interpose entre le soleil et la surface de la terre (figure 4.2), de sorte qu'une partie seulement de la radiation solaire peut atteindre directement le sol [23].

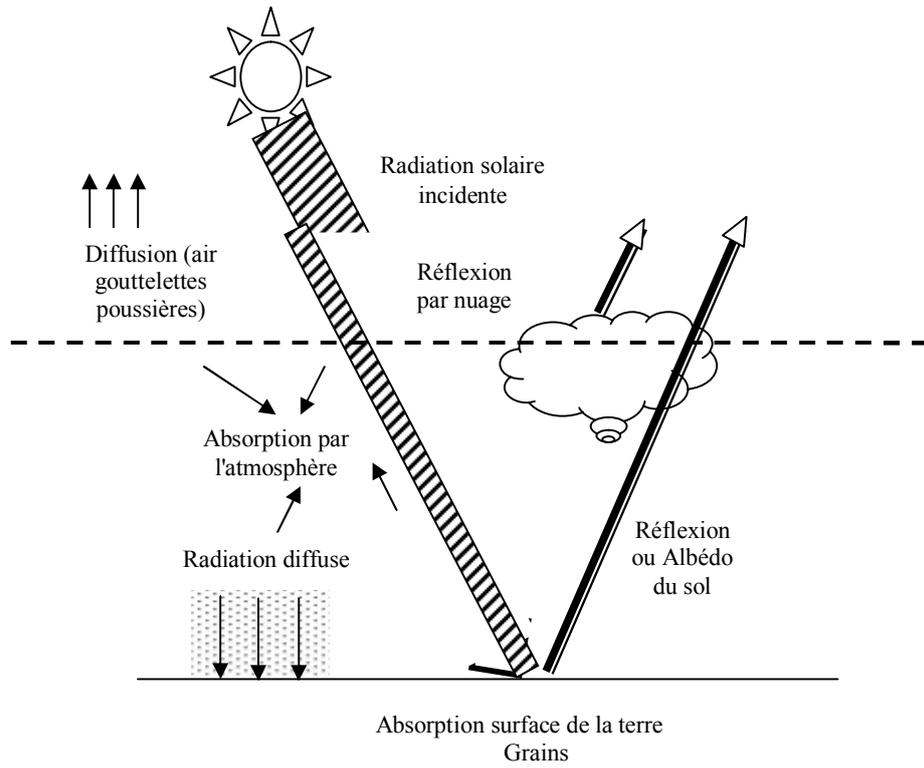
Il arrive qu'en certains cas très favorables (atmosphère exceptionnellement limpide et sèche des déserts tropicaux) cette radiation solaire directe atteigne jusqu'au trois quart de la constante solaire. L'atmosphère absorbe une part du rayonnement solaire, et diffuse une autre part. A ces actions s'ajoute enfin un phénomène de réflexion [23-4].

L'absorption est essentiellement liée à la présence de vapeur d'eau qui existe dans l'air en quantité relativement faible et qui est capable d'absorber six fois plus d'énergie solaire que les autres gaz [4].

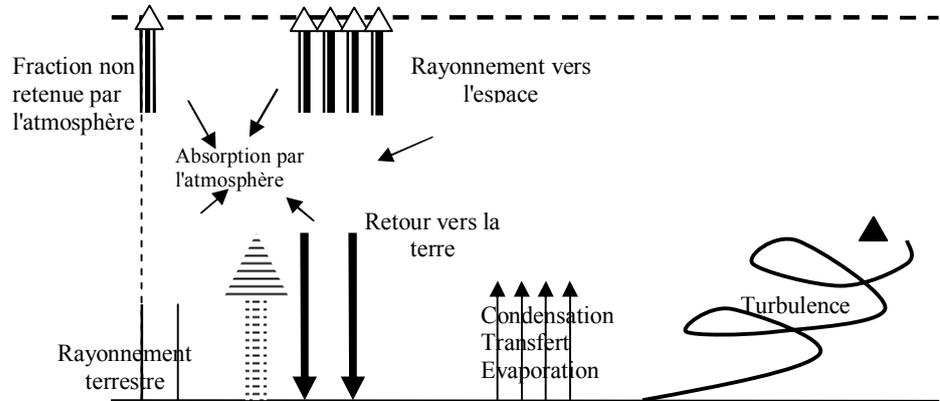
Il est à remarquer qu'une bonne partie du rayonnement diffus atteint le sol et s'ajoute à la radiation solaire directe pour former la radiation globale. Avec un écran nuageux mince, l'augmentation de la diffusion peut compenser la diminution du rayonnement direct, de telle manière que la radiation globale reste élevée; mais un plafond nuageux épais se traduit certainement par une baisse de la radiation globale, car à l'importante de l'absorption s'ajoute la part croissante d'énergie perdue par réflexion. Cette fraction d'énergie solaire réfléchie s'exprime en pourcentage par rapport à l'énergie incidente et reçoit le nom d'Albédo [23].

Au total, malgré cette part d'énergie perdue par réflexion, le sol absorbe une partie de la radiation solaire. Puisque la température de la planète est en gros constante, il faut bien que les terres et les mers perdent une quantité d'énergie égale à celle qu'elles reçoivent [24].

Comment est restituée cette énergie gagnée ? Elle est d'abord restituée par rayonnement terrestre, mais ce mécanisme ne saurait à lui seul rendre compte de façon satisfaisante de l'ensemble du transfert de chaleur du sol à l'air. Comme la conduction n'a qu'un rôle faible ou négligeable, il faut faire intervenir à la fois les mouvements de brassage (turbulence et convection) et le puissant transfert d'énergie que constitue le couple évaporation- condensation. Alors que l'évaporation exige une consommation d'énergie, la condensation libère au contraire l'énergie emmagasinée en quelque sorte [23-4].



Ondes courtes



Grandes longueurs d'onde

**Figure 4.2: Rayonnement solaire et rayonnement terrestre**

## 4.5 Bilan énergétique

Afin d'établir l'équation du bilan énergétique d'un masque en béton bitumineux, nous avons besoin de déterminer [23] :

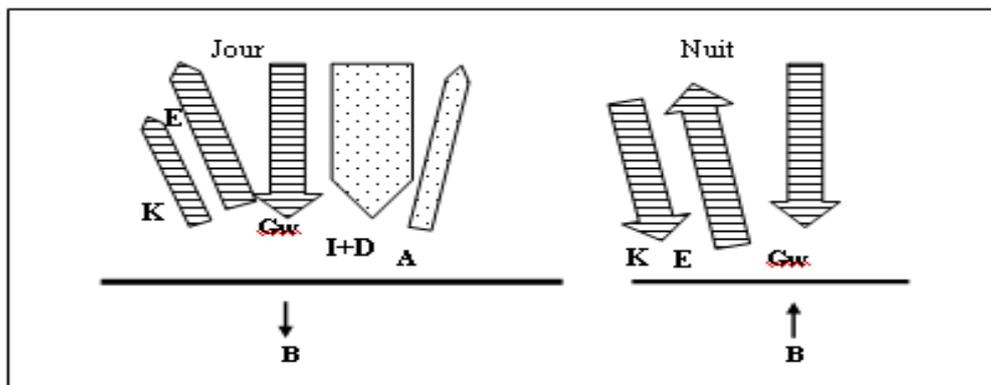
- 1- Le rayonnement solaire direct (I),
- 2- Le rayonnement solaire diffus (D) qui forme avec les rayons directs le rayonnement solaire global (G = I+D),
- 3- Le rayonnement solaire réfléchi de la surface du masque et qui s'éloigne (A),
- 4- Le rayonnement émis par le masque et transmis dans le milieu (E),
- 5- Le rayonnement de l'atmosphère (G<sub>w</sub>),
- 6- L'échange calorifique entre le masque et la masse atmosphérique (K),
- 7- L'énergie terrestre absorbée ou dégagée (B).

L'équation du bilan énergétique (figure 4.4) [5-8-24] s'écrit comme suit [23-4] :

$$[I + D - A - E + G_w \pm K] \Delta t \pm B = 0 \quad (4.1)$$

Où  $\Delta t$  : Le pas de temps de calcul.

L'équation ne prend pas en considération l'évaporation au niveau de la surface du masque car elle diminue la possibilité d'atteindre le maximum de la température [20].



**Figure 4.3 : Schéma explicatif de l'équation du bilan énergétique**

Pour estimer la température à la surface et à différentes profondeurs par l'équation sus citée les courants d'énergie précédents ont été subdivisés en deux grands groupes [20].

Le 1<sup>er</sup> groupe est indépendant de la température de la surface ( $T_o$ ) et comprend [20]:

-G<sub>w</sub> : Réflexion ou Albédo du sol,

- A : Rayonnement solaire réfléchi,
- D : Rayonnement solaire diffus,
- I : Rayonnement solaire direct.

Le 2<sup>ème</sup> groupe est lié au contraire à la température [20], de la surface ( $T_0$ ) et comprend :

- B : Energie terrestre absorbée ou dégagée,
- K : Echange calorifique entre le masque et la masse atmosphérique,
- E : Rayonnement émis par le masque et transmis dans le milieu.

Nous avons résolu l'équation précédente (4.1) afin d'estimer la température à la surface  $T_0$  et à différentes profondeurs.

L'injection des données qui concernent le barrage étudié dans le modèle utilisé [11], nous avons trouvé les résultats suivants :

Cas étudiés	modèle
Température maximale sur la surface du Masque (°C),	68.8
Température maximale à 6 cm de profondeur; masque sous couche de peinture (°C),	55.5

**Figure 4.4 : Variation de la température maximale mesurée sur la surface en fonction du temps**

**Figure 4.5 : Variation de la température maximale calculée sur la surface et à une profondeur de 6 cm**

## **Conclusion**

Après la détermination de la température maximale sur la surface du masque du barrage, on peut confectionner un échantillon avec des caractéristiques recommandées telles que :

### **Les caractéristiques des agrégats "mélange"**

- Le poids spécifique,
- Le sable équivalent.

### **Les caractéristiques du bitume**

- L'indice de pénétration :
- Point de ramollissement "bille et anneau".
- La résistance à la compression,
- La perméabilité,
- Le pourcentage d'imbibition
- Le pourcentage de gonflement,
- La stabilité suivant Marshall après immersion de 14 jours,
- La stabilité sur le talus.

### **Vérification de la stabilité du masque**

Pour vérifier la stabilité des revêtements bitumineux posés sur le talus, nous avons placé un échantillon pendant 48 heures sur un support incliné (la pente du barrage El-Agrem) dans une étuve à une température de 70 °C et on vérifie est ce que l'échantillon a gardé sa forme initiale ou non.

Si les résultats obtenus respectent les normes recommandées, on construit des échantillons pour la réalisation du masque proposé.

## CONCLUSION GENERALE

Face à un projet de barrage en terre, le souci de l'ingénieur est de créer un ensemble constitué du barrage et de sa fondation étanche, de façon à éviter (éliminer) les infiltrations, réduire le volume de fuite et éviter les accidents.

Malgré le bon choix des matériaux (étanches), la saturation du sol provoque une augmentation des pressions interstitielles, ce qui favorise la formation des fissures longitudinales qui risquent de se propager vers le noyau et tout le corps du barrage et qui, par conséquent, met en danger la stabilité des barrages en terre.

Le tableau qui résume les différents aspects à prendre en compte dans la comparaison des solutions proposées "organes d'étanchéité". Il résulte de cette analyse que :

La solution du noyau argileux doit être écartée vu la faible quantité de matériaux silteux disponible.

La solution du masque en béton dont le coût est élevé à celui du masque en béton bitumineux et qui est la moins adaptée aux conditions du site "géologie et sismicité", ne présente pas d'intérêt marqué par rapport à ce dernier.

La solution du noyau en béton bitumineux ne présente d'intérêt particulier ni sur le plan de la sécurité, ni du coût.

La solution du masque en béton bitumineux est intéressante, vu la facilité de mise en œuvre, la disponibilité des matériaux, inspection du masque à tout moment, réparation facile en cas de défaillance, réalisation après exécution des travaux de remblai, adaptation à une déformation raisonnable de la recharge amont sous l'effet de son propre poids et de la charge de l'eau du réservoir, suite à la consolidation de la fondation et le coût.

Nous pouvons confirmer donc que, sur le plan technique et économique, le masque en béton bitumineux reste le meilleur organe d'étanchéité à réaliser, est adapté aux barrages en remblai et autres ouvrages hydrauliques, étant donné les qualités mécaniques et hydrauliques

du matériau. Le problème majeur de ce type de masque est la maîtrise de la température maximale sur la surface due au rayonnement solaire.

La méthode de calcul utilisée est particulièrement intéressante pour l'évaluation de la température maximale sur la surface et à différentes profondeurs des masques et autres écrans en béton bitumineux.

En fin, le choix de l'organe de l'étanchéité est l'un des éléments les plus importants du processus de conception et de construction pour assurer l'étanchéité des barrages en remblai.

Dans le présent travail nous avons essayé de mettre à la disposition des ingénieurs praticiens, des contributions et des recommandations qui les aideront à identifier toute la série de problèmes qui sont à considérer dans le choix des organes d'étanchéité pour les barrages en remblai.

## *Références Bibliographiques*

- [1] Brousek N., «" la protection des parements des barrages en terre et en enrochement " », XI<sup>ème</sup> ICOLD, Madride, 1973.
- [2] J. M. Durand et al: Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale, cemagref éditions –ISBN 2- 85362-511-7/1999.
- [3] Schoenian E.," Bitumen in Hydraulic Engineering", International Petroleum Company, London, 1994.
- [4] Djemili. L: Critères de choix de projet des barrages en terre « étanchéité par le masque en béton bitumineux », thèse de Doctorat, 2006.
- [5] CIGB, Étanchéité des barrages par géomembranes : technique actuelle, 1991.
- [6] Manojlovic (J.), Herment (R.), Perrés au mastic butimineux pour les digues submersibles, Revue Générale des routes et des aérodromes ,1992.
- [7] RSW Inc. Aménagement de la Touloustouc, Barrage-Variante à masque amont. Résultat de l'analyse contrainte-déformation, 2001.
- [8] Manojlovic (J.), Herment (R.), Perrés au mastic butimineux pour les digues submersibles, Revue Générale des routes et des aérodromes, 1992.
- [9] CIGB, Barrages en remblai : protection du talus amont, 1993.
- [10] MARCHE C., LAVALLEE D. La définition du risque de rupture d'un barrage incidence sur l'évaluation de sa sécurité. In: 2nd International Conference on Decision Making Urban and Civil Engineering – DM in UCE 2000, Lyon, 2000.

[11] CFGB, " L'expérience française des masques amont en béton bitumineux", XI<sup>ème</sup> ICOLD, Madrid, Q 42, R 7, 1973.

[12] Alonso (E.), Poulain (D.), Influence des caractéristiques mécaniques et des pressions interstitielles sur la stabilité des barrages en terre homogènes, journées nationales d'étude AFEID-CFGB « petits barrages », Bordeaux, Cemagref édition, 1994 .

[13] <http://www.aude.pref.gouv.fr/ddrm/risque-barr/bar2.html> (se site présente des exemples de rupture de barrage).

[14] [http://www.barrages-cfgb.org/Info/pr\\_barC4.html](http://www.barrages-cfgb.org/Info/pr_barC4.html) (se site présente les raisons de la construction d'un barrage et les premier barrages construit par des civilisations).

[15] CFG., Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes, Comité Français des Géosynthétiques, Rueil-Malmaison, 1991.

[16] Ministère de l'agriculture française: Technique des barrages en aménagement rural, édition, 1977.

[17] ROLLEY R. Dir. Technique des barrages en aménagement rural, 1989.

[18] FRY J.J., CARRERE A. Modélisation des barrages en remblai. In: Colloque Technique 2001 du CFGB, Aix-en-Provence, 2001.

[19] CARRERE A. Conception des barrages voûtes. In: Colloque Technique 2001 du CFGB, Aix-en-Provence, 2001.

[20] Junhans H., " Durée du levé de soleil et réception du rayonnement solaire par des plans inclinés " , Rapport scientifique, Berlin, 1969.

[21] Cerrere Alain, Barrages, Technique de l'Ingénieur, 1996.

[22] [http : www.edf.fr](http://www.edf.fr) (se site EDF présente les barrage et leurs fonctionnements).

[23] Bouvenot A., " Transferts de chaleur " , Collection technologique, Masson, Paris, 1981.

[24] Kreitman M.," 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, 1959.

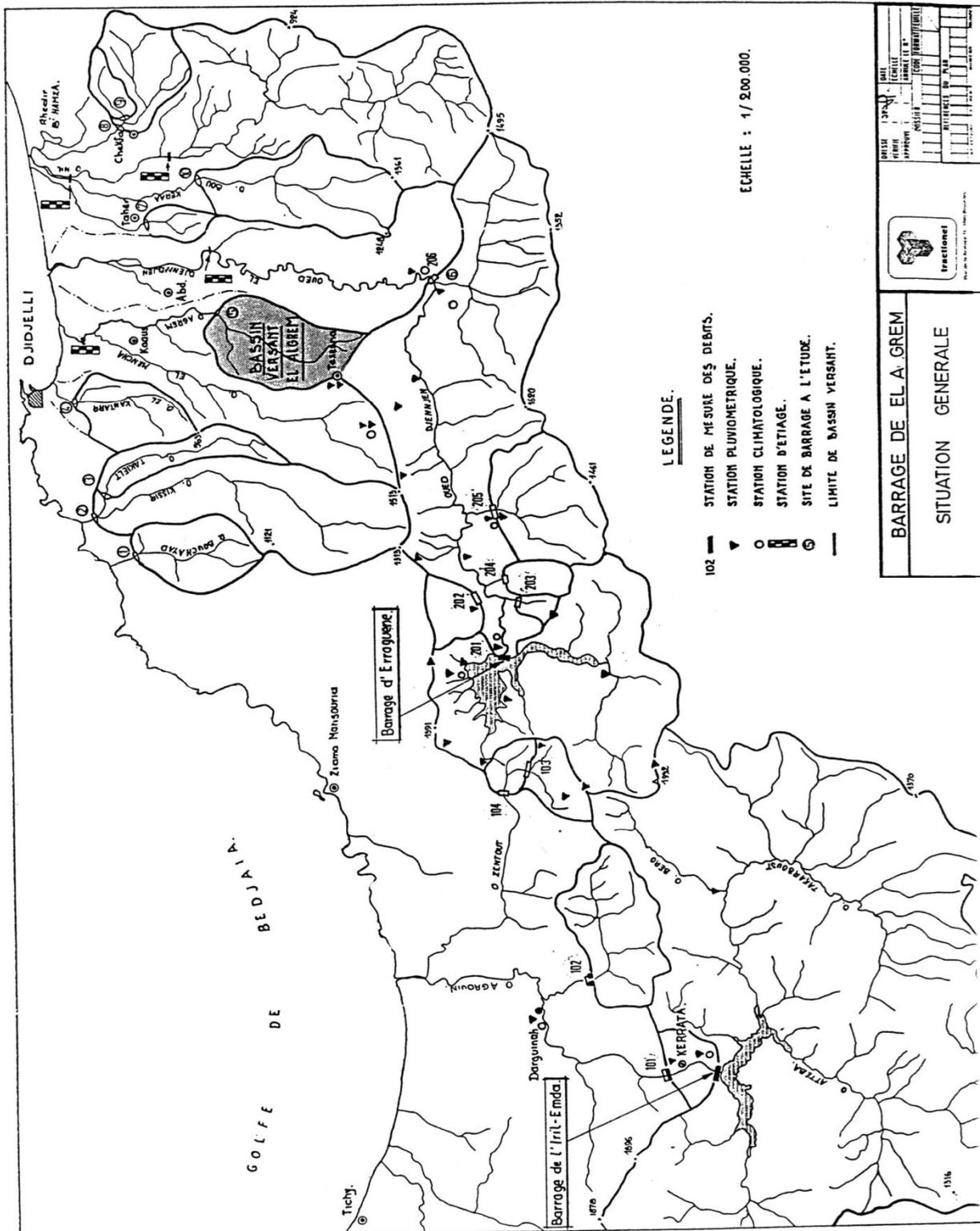
[25] A.N.B.,"Barrage El Agrem", Monographie, Vol I, Juin 2001.

[26] D.G.I.H.,"Barrage d'El Agrem", Etude des variantes, Rapport partiel n°6, Août 1985.

[27] Djemili L., Boudoukha A., Chiblak M., et Aoun H. "Simulation numérique de la température des masques en béton bitumineux. Barrage Ghrib Algérie", Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, n° 4,2005.

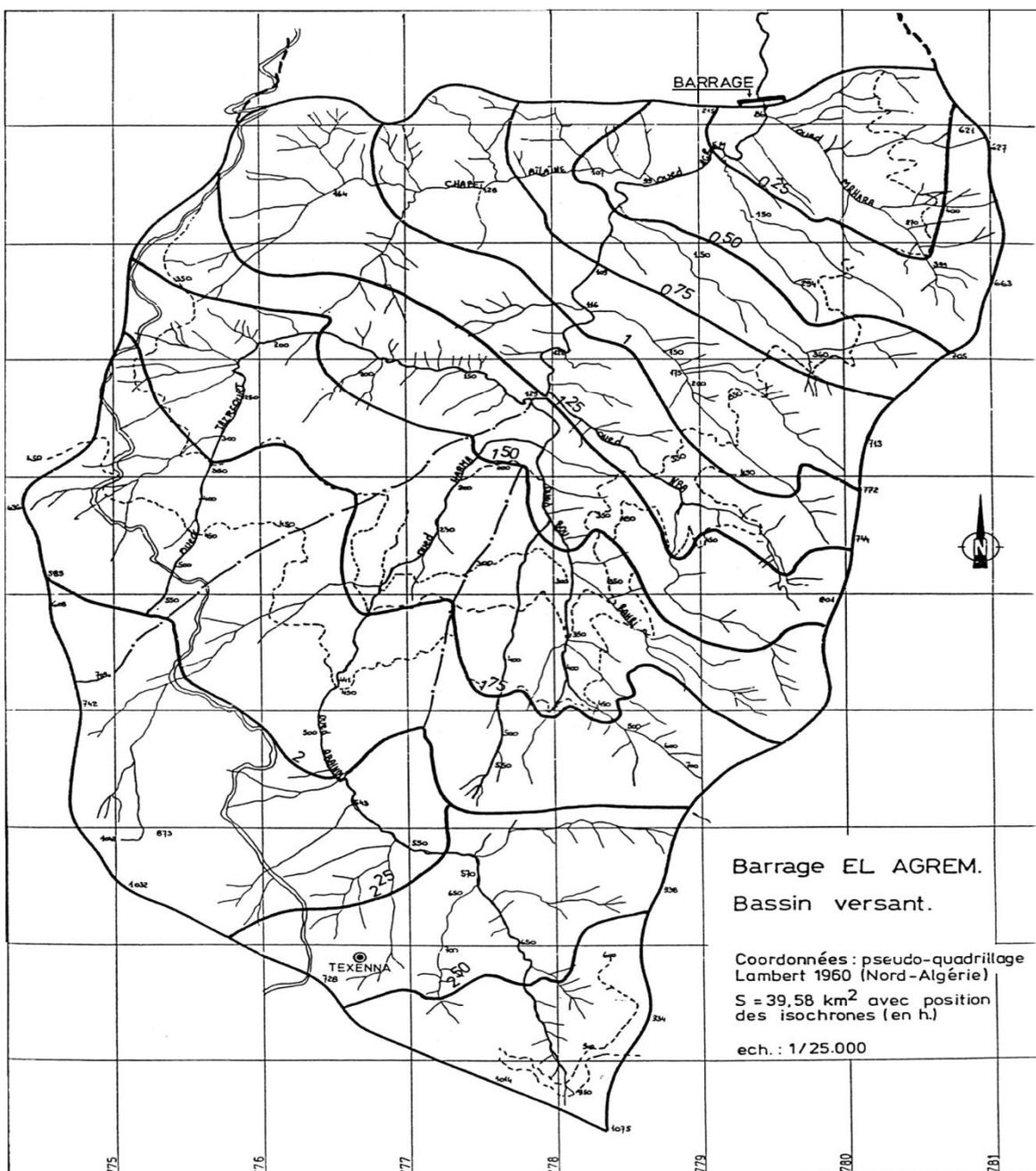
# ANNEXE 01

## Situation générale du barrage El-Agrem



# ANNEXE 02

## Le bassin versant d'El-Agrem



## *ANNEXE 03*

### La précipitation moyenne annuelle a Texenna, Djidjelli et Taher détaillée

Année	Texenna (mm)	Djidjelli (mm)	Taher (mm)
1913-14	1582	1444	1107
1914-15	1109	1298	1117
1915-16	1284	1591	1179
1916-17	1107	1295	1065
1917-18	1008	1504	1223
1918-19	1500	1425	1391
1919-20	952	1130	1043
1920-21	1452	1804	1576
1921-22	1216	1200	1180
1922-23	1786	1443	1200
1923-24	1024	1031	922
1924-25	1086	1188	966
1925-26	1246	1220	1234
1926-27	1753	1214	1676
1928-29	2351	921	1233
1929-30	2050	1055	1343
1930-31	1259	870	1214
1931-32	1570	1305	1089
1932-33	1378	1007	1238
1933-34	1339	1055	1508
1934-35	1395	1237	1199
1935-36	1561	1098	817
1936-37	1552	1081	996
1937-38	1102	767	607
1938-39	1214	921	213
1939-40	1553	1147	
1940-41	1106	1102	
1941-42	1402	802	
1942-43	1096	1224	
1943-44	1002	899	

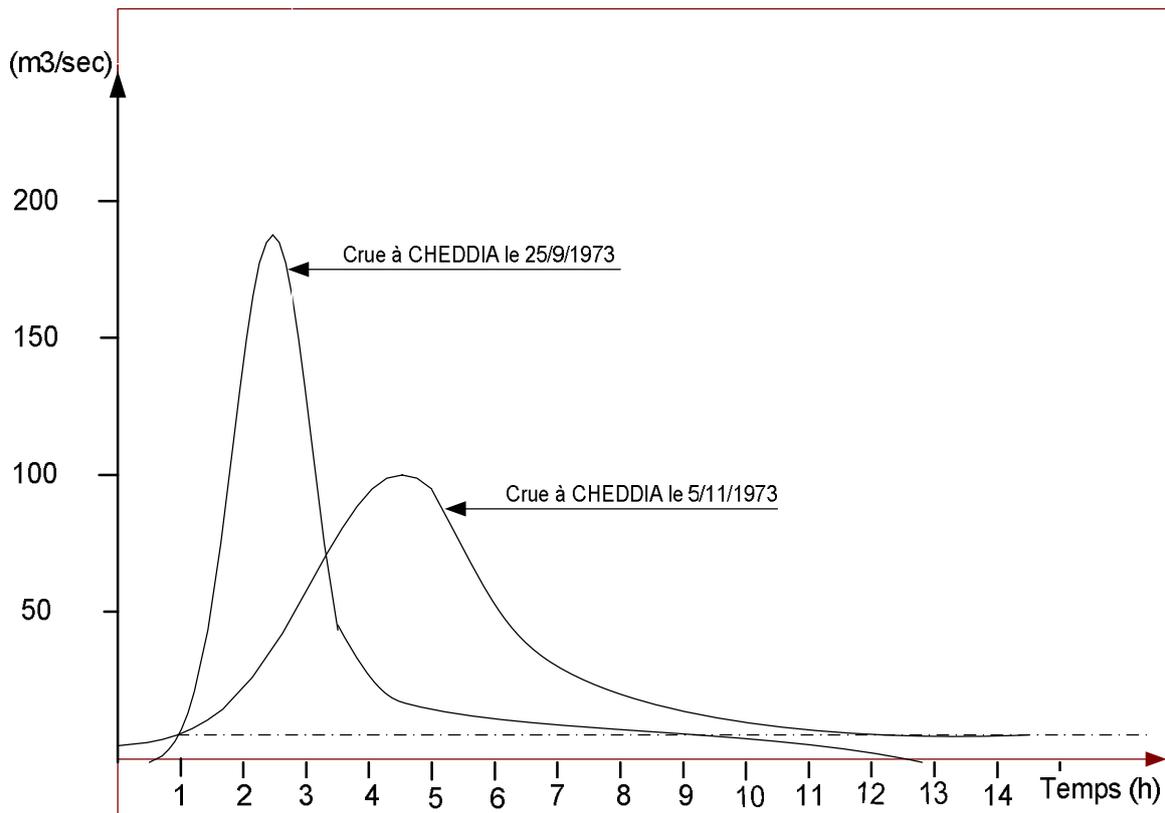
## *ANNEXE 03*

### La précipitation moyenne annuelle a Texenna, Djidelli et Taher détaillée

Année	Texenna (mm)	Djidelli (mm)	Taher (mm)
1944-45	1168		
1945-46	1204		
1946-47	1368		
1947-48	1204		
1948-49	1368		
1949-50	1302		
1950-51	1422		
1951-52	1242		
1952-53	1146		
1953-54	1450		
1954-55	1518		
1955-56	1447		
1957-58	1396		
1958-59	1618	451	
1959-60	1111		
1960-61	1769		
1968-69	1880		
1969-70	1490		
1970-71	928		
1971-72	838		
1972-73	760		
1973-74	1298		
1974-75	11701124		
1975-76	1448		
1976-77	1317		
1977-78	626		
1978-79	1363		
1979-80	1134		
1980-81	1371		
	963		
1981-82			
<b>Moyenne</b>	<b>1309</b>	<b>1176</b>	<b>1122</b>

# ANNEXE 04

## Hydrogrammes des crues observées à CHEDDIA



# ANNEXE 05

## Comparaison économique des variantes

Désignation	Unité	Prix unitaire	Quantité				Montants			
			noyau argileux épais	masque étanche en béton bitumineux	parement en béton armé	Noyau en béton bitumineux	noyau argileux épais	masque étanche en béton bitumineux	parement en béton armé	Noyau en béton bitumineux
Argile	m <sup>3</sup>	500,00	475.880,00	-	-	-	237.940.000,00	-	-	-
Béton bitumineux	m <sup>3</sup>	9.000,00	-	9.785,00	-	13.652,00	-	88.065.000,00	-	122.868.000,00
Béton armé	m <sup>3</sup>	35.000,00	-	-	16.320,00	-	-	-	571.200.000,00	-
Total							237.940.000,00	88.065.000,00	571.200.000,00	122.868.000,00

# ANNEXE 06

## Bassins versants Algériens

