

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option :VOA

Présenté par :

Mr :BELLAHRECHE MOHAMED

Mr :HACHEMI YUCEF

Sujet du mémoire

Effets des Drains sur la stabilité des Barrages en terre

Soutenu publiquement le 15 / 07 / 2021 devant le jury composé de :

Mr, BELMAHI Samir

Président

Mr, KHILOUN Mokhtar

Rapporteur

Mr, CHIKH Abdelbaki

Examineur

PROMOTION : 2020– 2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces



A mes très chers parents,

Mes très chers frères et soeurs

Et toute ma famille, auxquels je dédie ce travail.

A toutes les personnes qui m'ont aidé dans mon travail

Je ne saurais oublier tous mes collègues et amis, qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Mr : BELLAHRECHE Mohamed

Dédicaces



A mon père,

A ma mère

A ma famille frères et sœurs

A tous mes amis

A tous ceux qui me sont chers(es)

A tous les universitaires

Je dédie ce modeste travail

Mr : HACHEMI Youcef

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a aidé et donné la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus vifs à notre encadreur monsieur KHILOUN Mokhtar, professeur de l'université IBN KHALDOUN de Tiaret pour ses précieux conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à diriger ce travail.

Nos remerciements les plus respectueux vont également à monsieur BELMAHI Samir pour nous avoir fait le grand honneur d'accepter la présidence de ce jury.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à l'égard de monsieur CHIKH Abdelbaki d'avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail, qu'il trouve ici l'expression de notre profond respect.

Nous voudrions exprimer toute notre connaissance à tous les enseignants du département de génie civil et particulièrement ceux et celles qui ont contribué à notre formation.

Merci à nos amis et collègues, qui nous ont aidés pendant ce travail.

Résumé

Quelque soit la perméabilité d'un barrage en terre, il ya toujours infiltration dans son massif. Il n'existe pas d'étanchéité parfaite pour ce type d'ouvrage.

La maitrise des écoulements doit être recherchée de telle manière que les paramètres liés aux infiltrations restent en dessous des paramètres critiques (débit, pressions interstitielles, gradients hydraulique...et).

La conception des dispositifs de drainage constitue une préoccupation majeure en vue de leur rôle dans la sécurité des barrages. On doit analyser l'ensemble des paramètres ayant une influence sur les infiltrations et de valider les choix conceptuels et économiques.

Le présent travail s'intègre dans cette thématique et propose une analyse paramétrée pour l'optimisation des dimensions des systèmes de drainage (tapis drainant horizontal, drain cheminée vertical) des barrages en terre en fonction des critères de sécurité, notamment le développement des charges hydrauliques, des pressions interstitielles, de la configuration de la ligne de saturation, des capacités de décharges des drains et des gradients hydrauliques, l'influence de la position des drains sur les paramètres d'infiltrations.

Mots clés : Barrage, infiltrations, drainage, filtre, anisotropie, gradient hydraulique

Summary

No matter how permeable an earth dam is, there is always seepage into its core. There is no such thing as a perfect seal for this type of structure.

Flow control must be sought in such a way that the parameters related to seepage remain below the critical parameters (flow rate, pore pressures, hydraulic gradients, etc.).

The design of drainage systems is a major concern in view of their role in dam safety. It is necessary to analyse all the parameters influencing the infiltration and to validate the conceptual and economic choices.

The present work is part of this theme and proposes a parameterised analysis for the optimisation of the dimensions of drainage systems (horizontal drainage mat, vertical drain vertical chimney) of earth dams according to safety criteria, in particular the development of hydraulic loads, pore pressures, saturation line configuration the saturation line, the discharge capacities of the drains and the hydraulic gradients, the influence of the position of the drains on the infiltration parameters.

Key words: Dam, infiltration, drainage, filter, anisotropy, hydraulic gradient

ملخص

مهما كانت نفاذية سد الأرض ، هناك دائما التسلل في جوهرها. لا يوجد شيء مثل ختم مثالي لهذا النوع من الهيكل

يجب البحث عن عنصر التحكم في التدفق بطريقة تفيد بأن المعلمات المتعلقة بالسنيين لا تزال أقل من المعلمات الحاسمة (معدل التدفق، ضغوط المسام، التدرجات الهيدروليكية، إلخ)

تصميم أنظمة الصرف الصحي هو مصدر قلق كبير في ضوء دورهم في سلامة السد. من الضروري تحليل جميع المعايير التي تؤثر على التسلل والتحقق من صحة الخيارات المفاهيمية والاقتصادية

يعمل هذا العمل الحالي جزءا من هذا الموضوع ويقترح تحليلا معلماتا لتحسين أبعاد أنظمة الصرف الصحي (حصيرة الصرف الأفقية، مدخنة رأسية هجرة عمودي) لسدود الأرض وفقا لمعايير السلامة، ولا سيما تطوير الأحمال الهيدروليكية، ضغوط المسام وتكوين خط التشبع خط التشبع، وقدرات التفريغ في المصارف والجدران الهيدروليكية، وتأثير موقف المصارف على معلمات التسلل

الكلمات الرئيسية: سد، تسلل، تصريف، مرشح، أنيسوتروبي، تدرج هيدروليكي

Liste des abréviations

σ' : Contrainte effective normale à la base de la tranche

D_{15} et d_{85} : Diamètres correspondant respectivement à 15 % et 85% de pourcentage de tamisat cumulé.

V : Vitesse d'écoulement (m/s)

K : Coefficient de perméabilité (m/s)

P : Poids (kg)

γ_{sat} : Poids volumique du sol saturé (N/m³)

U_{M_2} et z_{M_2} : Pression de l'eau et la cote du point M_2 par rapport à un plan arbitraire fixé

N_h : Nombre de chutes d'équipotentialité

N_c : Nombre de canaux d'écoulement

dq : Débit dans un canal d'écoulement (entre deux lignes de courant adjacentes)

Δh : Perte de charge entre deux lignes équipotentiels adjacentes

a : Distance entre deux lignes de courants

b : Distances entre deux lignes équipotentiels

i : Gradient hydraulique

Q : Débit total (m³/s)

y_0 : Ordonnée du point de sortie de la surface libre

H_v : Hauteur des vagues (m)

L : Longueur du Fetch

R : Revanche (m)

H : Hauteur du barrage (m)

T : Tassements (%)

W : Poids propre de la pierre

a : Accélération du seisme

$\sum \overrightarrow{F_p}$: Somme des forces passives

$\sum \overrightarrow{F_a}$: Somme des forces actives

α : Angle du talus

L_d : Longueur du tapis de drainage (m)

L_B : Largeur en base du barrage (m)

L_d : Longueur du drain tapis (m)

L_b : Largeur transversale du barrage (m)

n : Porosité du sol

K_F : Coefficient de perméabilité du filtre

K_N : Coefficient d'infiltrations du remblai de la digue

d : Largeur en base du barrage (m)

b : Projection horizontale de la partie mouillée du parement amont.

d : Largeur en base du barrage (m)

b : Projection horizontale de la partie mouillée du parement amont

q : Débit d'infiltration ($m^3/s/ml$)

I : gradient hydraulique

K : Coefficient de perméabilité

A : Section d'infiltration par unité de longueur

I : Gradient hydraulique

I : Résistance d'infiltration du sol constituant la digue

Δh : Perte de charge dans le corps de la digue

δn : Epaisseur moyenne de la digue

I_{adm} : Gradient hydraulique admissible

J_{cr} : Gradient d'infiltration critique

K_s : Coefficient de sécurité

J_f : Gradient d'infiltration dans la fondation du barrage

T_c : Profondeur de calcul de la zone d'infiltration de la fondation

ΔH : Différence du niveau d'eau amont aval (m)

m : Coefficient de débit dépend de la forme de déversoir

b : Largeur du déversoir (m)

H : Charge d'eau sur le déversoir

V_1 : Vitesse dans le réservoir (m/s)

V_2 : Vitesse à la sortie de la vidange (m/s)

ΔH : Pertes de charge dans la conduite

$\sum \xi$: Somme des pertes de charges singulières

λ : coefficient de pertes de charge

N : Viscosité cinématique de l'eau (m^2/s)

Sommaire

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Sommaire.....	iii
Introduction Générale.....	1

Chapitre1 Généralités sur les barrages enterre

I.1. Introduction.....	3
I.2. Eléments constructifs d'un barrage	4
I.2.1. Terminologie.....	4
I.3. Types de barrages en remblai.....	5
I.4. Classification des barrages en terre.....	6
I.4.1. Barrage en terre homogène.....	6
I.4.2. Barrage en terre hétérogène ouzone.....	6
I.4.3. Barrage à masque amont.....	8
I.4.4. Barrage à membrane centrale.....	9
I.5. Facteurs influençant la conception et la réalisation des barrages en remblais.....	10
I.6. Conclusion.....	12

Chapitre 2 Etude des infiltrations dans le mur et sa fondation

II.1. Introduction.....	14
II.2. Détermination de la ligne de saturation par la méthode de Kozeny.....	14
II.2.1. Ligne de saturation pour barrage homogène sans drain sur sol Impermeable.....	14
V.2.2. Ligne de saturation pour un barrage homogène avec drain.....	16
II.2.3. Ligne de saturation pour un barrage à noyau sur fondation impermeable....	17
II.2.4.Ligne de saturation pour barrage fondé sur sol permeable.....	17
II.3. Notion d'hydraulique du sol.....	18
II.3.1. Charge hydraulique.....	18
II.3.2. Gradient hydraulique.....	18
II.3.3. Loi de Darcy.....	19
II.3.4. Forces d'écoulement.....	19
II.3.5. Lignes d'équipotentiels et lignes de courant.....	20
II.4. Tracé du réseau d'écoulement dans le cas des barrages en remblai par	21

II.4. 1. La méthode graphique.....	21
II.5. Pression de l'eau dans le corps du barrage.....	24
II.6. Débit de fuite.....	25
II.7. Erosion interne, phénomène de Renard et Boulance.....	26
II.8. Méthodes de préventions.....	27
II.9. conclusion.....	28

Chapitre 3 Disposition de drainage dans les barrages en terre

III.1. Dispositifs de protection contre les effets de l'eau.....	30
III.1.1. Introduction	30
III.1.2. Nature des matériaux granulaires (Règle de filtre).....	30
III.2. Dispositifs drainants dans un barrage en terre.....	31
III.3. Drains et filtres dans les barrages en terre.....	32
III.3.1. Classes des filtre	34
III.3.2. Rôle des filtre	34
III.3.3. Dimensionnement des filtre	35
III.3.4. Les drains.....	37
III.3.5. Rôles des drains.....	37
III.4. Disposition des drains et des filtre	38
III.5. Différents types de drainages et leur dimensionnement.....	38
III.5.1. Drain horizontal (tapis interne).....	38
III.5.2. Drain vertical (drain cheminée).....	40
III.5.3. Prisme de drainage.....	43
III.5.4. Drainage de surface.....	44
III.5.5. Prisme de drainage avec drainage de surface.....	45
III.5.6. Prisme de drainage avec drain tapis interne.....	46
III.5.7. Drainage à bande.....	47
III.5.8. Puits filtrants de décompression.....	48
III.5.9. Utilisation des géotextiles comme filtre ou drain dans un barrage en terre.....	49
III.6. Différences entre les filtres de géotextiles et les filtres granulaires.....	51
a. Uniformité.....	51
b. Maintien de la continuité.....	51
c. Épaisseur.....	52
III.7. Transitions intermédiaires.....	52
III.8. Drainage de la fondation.....	52

III.9. Conclusion.....	53
------------------------	----

Chapitre IV Dispositifs de protection contre les effets de l'eau cas du barrage Dahmouni

VI.1. Localisation.....	55
VI.2. Caractéristiques hydrologiques.....	55
VI.3. Caractéristiques de la retenue.....	56
VI.4. Caractéristiques techniques du barrage de DAHMOUNI.....	57
VI.5. Choix du drain.....	58
VI.5.1. Dimensionnement du tapis drainant.....	58
VI.5.2. Choix du filtre.....	58
VI.6. Protection de la digue.....	59
VI.6.1. Protection des talus.....	59
VI.6.2. Détermination de l'épaisseur minimale de la couche d'enrochement.....	60
VI.6.3. Protection de la crête.....	60
VI.6.4. Étanchéité de la fondation.....	61
VI.7. Drainage du barrage.....	61
VI.7.1. Dimensionnement du drain prisme.....	62
VI.7.2. Calcul des filtre.....	62
VI.7.3. Règles générales de dimensionnement des filtre.....	63
VI.7.4. Vérification de la condition d'absence du phénomène de renard.....	64
VI.7.5. Vérification de la suffisance de la perméabilité du filtre.....	64
VI.7.6. Vérification de la résistance d'infiltration du sol du barrage.....	64
VI.7.7. Fondation du barrage.....	65
VI.8. Le dispositif de drainage.....	66
VI.9. Conclusion.....	69
Conclusion Générale.....	71
Bibliographie.....	74

Liste des figures

Figure I.1. Catégories des barrages en remblai (Anton et Pougatsch, 2011).....	3
Figure I.2 : Eléments constructifs d'un barrage.....	4
Figure I.3 : Coupe schématique d'un barrage en remblai.....	5
Figure I.4 : Barrage en terre homogène avec drain.....	6
Figure I.5 : Barrage zone.....	7
Figure I.6 : Barrage à masque amont.....	8
Figure I.7 : Masque en béton armé (barrage New Spicer Meadow, USA).....	8
Figure I.8 : Pose de géomembrane (Barrage de Sar Cheshmeh, Iran).....	9
Figure I.9 : Barrages en remblai avec membranes centrales.....	10
Figure I.10 : Influence de la fondation sur la conception du barrage (Schleiss, A. J. 2004).....	11
Figure II.1 : Ligne de saturation pour barrage homogène sans drain sur sol imperméable.....	15
Figure II.2 : Ligne de saturation d'un barrage à drain horizontale.....	17
Figure II.3 : Ligne de saturation d'un barrage à noyau.....	17
Figure II.4 : Bilan des forces exercées sur un volume élémentaire de sol.....	20
Figure II.5 : Réseau d'écoulement.....	21
Figure II.6 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène sur sol imperméable sans drain.....	22
Figure II.7 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol imperméable.....	22
Figure II.8 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol perméable de même perméabilité que le massif.....	23
Figure II.9 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de terrain d'assise moins perméable que le massif du barrage ($K_1 > K_2$).....	23
Figure II.10 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas d'une vidange partielle.....	24
Figure II.11 : Détermination de la pression interstitielle.....	24
Figure II.12 : Erosion interne.....	26
Figure II.13 : Phénomène de Boulance.....	27
Figure III.1 : Exemple d'un sol très gradué.....	31
Figure III.2 : Granulométrie d'un filtre (Rolley et al, 1994).....	36
Figure III.3 : Drain tapis interne (Messaid, 2009).....	38
Figure III.4 : Drain tapis filtrant (Rolley et al, 1994).....	39
Figure III.5 : Tapis drainant aval-rabattement de la ligne de saturation (Meriaux et al, 1999).....	39

Figure III.6 :Drainvertical(Messaid,2009).....	40
Figure III.7 :Dispositifdrainantd'unremblaiargileuxhomogène(Degoutte,2002).....	40
Figure III.8 :Drainvertical(Meriauxetal,1999).....	41
Figure III.9 :Drain vertical recreusé dans le remblai et remplissage par du sable drainant et autofiltrant.....	41
Figure III.10 :Dispositifs des filtres et du drain verticaux.....	42
Figure III.11 :Différentstypesd'exutoiredudraincheminée(Lautrin,2002).....	42
Figure III.12 :Prismededrainage(Messaid,2009).....	43
Figure III.13 :Drainagedesurface(Messaid,2002).....	45
Figure III.14 :Prismededrainageavecdrainagedesurface(Messaid,2002).....	46
Figure	III.15
:Prismededrainageavecdraintapisinternesurfondationsimpermeables(Messaid,2002).....	46
Figure	III.16
:Prismededrainageavecdraintapisinternesurfondationspermeables(Messaid,2002).....	47
Figure III.17 :Drainageàbande(Messaid,2002).....	47
Figure III.18 :Puitsfiltrants(Rolleyetal,1994).....	49
Figure III.19 :Draingranulaireinclinéentouréparungéotextile(Degoutte,2002).....	50
Figure III.20 :Drainageverticalassuréparungéotextilecomposite(Degoutte,2002).....	51
Figure VI.1 : Localisation du barrage de DAHMOUNI (google imagerie).....	55
Figure VI.2 : Barrage de DAHMOUNI.....	56

Liste des tableaux

Tableau II.1: Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité (Schlosser 1988).....	19
Tableau II.2: Quelques valeurs de perméabilité « k » (G. Castagny, 1992).....	19
Tableau II.3: Coefficient de LANE en fonction de la nature de terrain (Rolley, Kreitmann et al.1977).....	28
Tableau IV.1 : Caracteristiques techniques du barrage de DAHMOUNI.....	57
Tableau VI.2 : Epaisseur mini de la couche d'enrochement en fonction de la hauteur des vagues.....	60
Tableau VI.3 : Classification des barrages.....	65
Tableau VI.4 : Gradient admissible à travers le remblai terreux.....	65
Tableau : VI.5 : Détermination du gradient d'Infiltration admissible.....	66
Tableau : VI.6 : Détermination de coefficient de sécurité.....	66

Introduction Générale

Introduction Générale

La sécurité des barrages constitue le souci permanent des ingénieurs chargés de leur conception, pour au moins deux raisons : éviter les ruptures catastrophiques, éviter de compromettre l'exploitation de l'ouvrage, la défaillance d'un barrage peut affecter des intérêts économiques vitaux et entraîner des dommages sérieux.

Les infiltrations peuvent être dangereuses pour la stabilité des ouvrages si des moyens de lutte efficaces ne sont pas prévus. Parmi les moyens de lutte contre les effets des infiltrations on intègre toujours un système de drainage qui est associé à des filtres de transition.

Le dispositif de drainage dans un barrage en terre est un élément très complexe car il faut choisir son type, fixer soigneusement ses dimensions et bien le positionner dans le massif pour qu'il soit efficace. Certains types de drainages sont étroitement dépendants des conditions propres aux barrages et aux conditions de présence ou non de l'eau en aval ce qui peut faire ressortir leurs caractéristiques.

Le choix et la conception des dispositifs de drainage et leur influence sur les caractéristiques d'écoulement sont très importants.

Les drains dans les barrages en terre sont des éléments constructifs essentiels et indispensables à la lutte contre les problèmes d'infiltration en rabattant la ligne phréatique au maximum pour maintenir une grande partie de l'ouvrage non saturée, ce qui renforce sa stabilité mécanique. Mais pour jouer convenablement son rôle, un drain, doit avoir des dimensions soigneusement choisies et placé à une position admissible sur le plan technique et acceptable sur le plan économique.

L'objectif du présent travail est de dimensionner un drain dans un barrage en terre et permettre de choisir son emplacement d'une manière efficace dans la digue.

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

- Le premier chapitre est consacré aux Généralités sur les barrages en terre
- Le deuxième chapitre aborde l'étude des infiltrations dans le mur et sa fondation
- Le troisième chapitre présente la disposition de drainage dans les barrages en terre
- Le quatrième et dernier chapitre s'intéresse aux dispositifs de protection contre les effets de l'eau cas du barrage Dahmouni

Chapitre 1

Généralités sur les barrages enterre

Chapitre1 Généralités sur les barrages enterre

I.1. Introduction

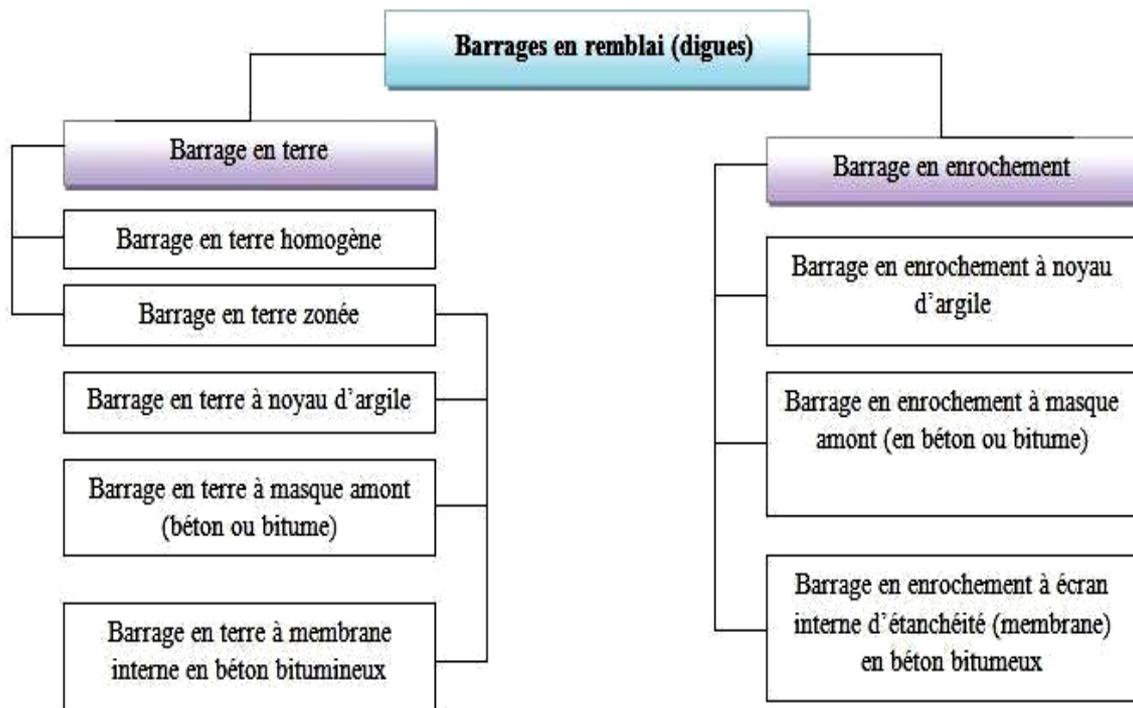
Les barrages en remblai sont des barrages constitués de matériaux meubles allant de l'argile fine à des éléments très grossiers (enrochements). Ils regroupent plusieurs catégories en fonction de la méthode employée pour assurer l'étanchéité. Ce type d'ouvrage très ancien est le plus utilisé, En Algérie plusieurs barrages sont construits en matériaux meubles , c'est le cas des barrages Hammam Bouhrara , Sidi abdelli , Ghrib, Bakhadda,....

On distingue deux catégories de barrage en remblai :

- Les barrages en terre, réalisé à partir de sols naturels meubles prélevés à proximité du site de l'ouvrage.
- Les barrages en enrochement, dont la majeure partie est constituée de matériau de Carrières concassé.

La figure I.1 représente les sous types de barrage, pour les deux catégories de barrages en remblai en fonction du matériau de construction, et du dispositif d'étanchéité.

Figure I.1. Catégories des barrages en remblai (Anton et Pougatsch, 2011).



Dans notre travail on vas s'intéresser qu'aux barrages enterre

I.2. Eléments constructifs d'un barrage :

Un barrage est généralement composé par :

- La digue ;
- L'évacuateur de crues ;
- La prise d'eau ;
- La vidange du fond.



Figure I.2 : Eléments constructifs d'un barrage.

I.2.1. Terminologie

La figure suivante donne la coupe schématique d'un barrage en remblai (FigureI-2) Ou Sont mentionnés les principaux termes utilisés pour caractériser les composantes de ce type de barrage. On notera surtout :

- Crête: Elle facilite la circulation sur le barrage une fois terminée. Le niveau de la crête définit la hauteur maximale qu'atteint le barrage.
- Berne(Risberme) :Elle permet la réalisation et la réparation des revêtements de talus, contribue à la stabilité des digues, réduit la vitesse des eaux de ruissèlement sur les surfaces des talusavals.
- Ecran d'injection: C'est généralement un coulis de ciment ou de résine injecté dans la base du barrage pour diminuer les fuites à travers le sol de fondation en colmatant les pores et les fissures.
- Drains: Ce sont des organes de barrage réalisés en matériaux pulvérulent et drainants. Ils servent à contrôler et à orienter les infiltrations dans le corps du barrage. Ils peuvent être horizontaux, verticaux ou de pied

- Filtres: Ce sont des dispositifs incorporés avec les drains. Ils sont réalisés en matériaux drainants et permettent d'éviter le colmatage des drains et l'érosion interne du massif.
- Noyau: C'est un organe réalisé souvent en matériau fin imperméable, il permet l'étanchéité des barrages zonés.
- Recharge: Elle est réalisée en matériau grossier et placée de part et d'autre du noyau. Elle est indispensable pour la fonction de stabilité du barrage.
- Parement de protection: C'est une couche mince placée sur les parements pour lutter contre l'action des vagues et de la pluie.
- Revanche: La revanche R est la différence de cote entre les Plus Hautes Eaux (PHE) correspondant à la crue de projet et la crête pour éviter la submersion du remblai par les vagues.
- Tapis étanche: Quand le fond du réservoir n'est pas très étanche, il est recommandé de le tapisser par un matériau imperméable permettant la diminution des fuites.

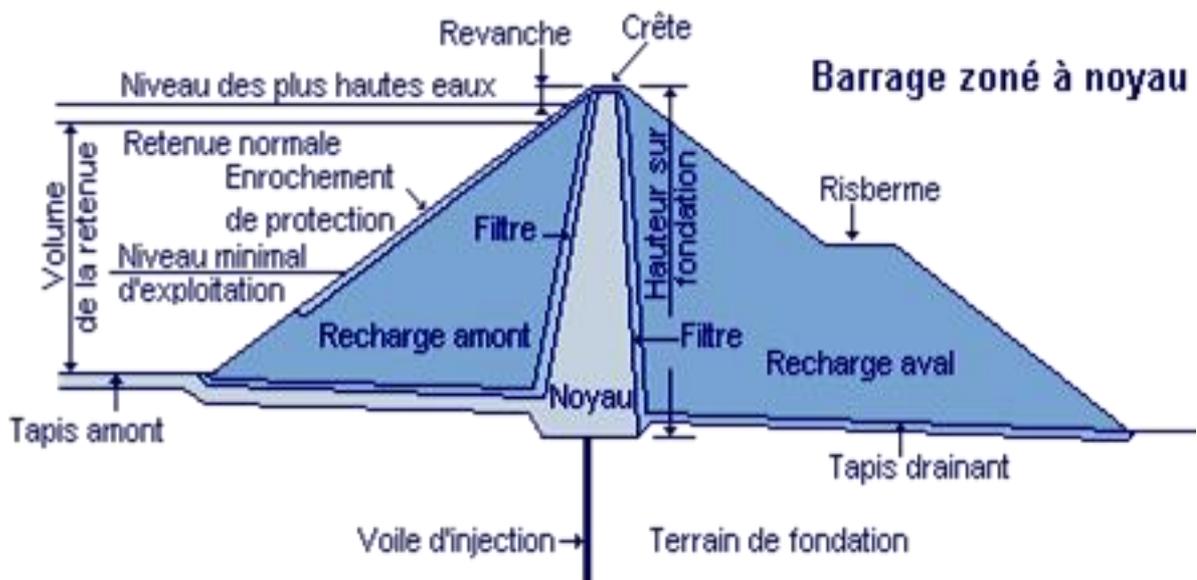


Figure I.3 : Coupe schématique d'un barrage en remblai.

I.3. Types de barrages en remblai

Les grands types de barrages en remblai sont :

- type 1 : barrages en terre homogènes, constitués de matériaux étanches ;
- type 2 : barrages à zones avec massif amont ou noyau central assurant l'étanchéité ;
- type 3 : barrages en matériaux perméables (sable, grave, cailloux, tout-venant) munis d'un dispositif d'étanchéité artificielle.

I.4. Classification des barrages en terre

Les barrages en remblai de terre se classent :

I.4.1. Barrage en terre homogène

Ce sont des barrages constitués d'un seul matériau qui garantit l'imperméabilité et la stabilité, accompagné de dispositifs de drainage contre la filtration (Figure I.3). Le remblai est constitué de matériaux du type argile, argile sablonneuse, limons, sable limoneux, etc.

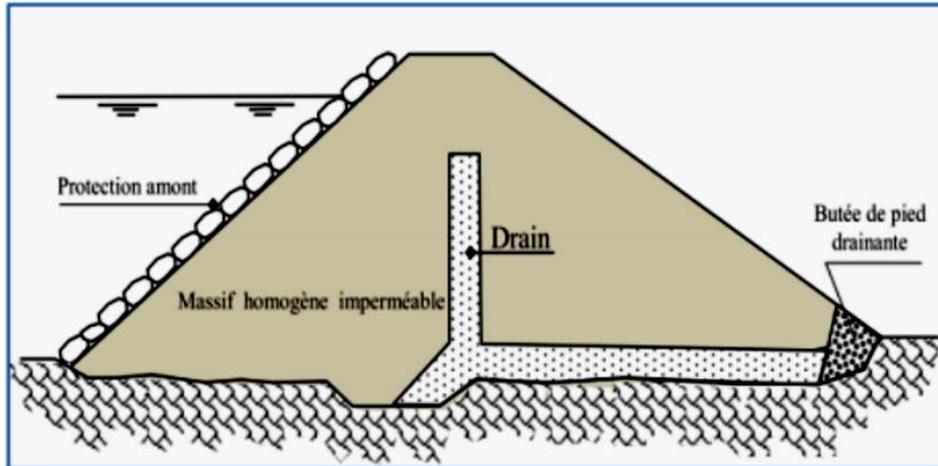


Figure I.4 : Barrage en terre homogène avec drain

I.4.2. Barrage en terre hétérogène ouzoné

Ce sont des barrages composés d'une zone centrale, appelée noyau, qui assure le rôle d'étanchéité. Placée au cœur du remblai, le noyau (vertical ou incliné) est constitué de matériaux argileux imperméables, d'épaisseur variable généralement plus large à la base à cause des pressions interstitielles plus fortes. La fonction de stabilité est apportée par les recharges (Figure I.4). Ces massifs plus perméables que le noyau sont réalisés en enrochements, ou en terre plus grossière. Pour se prémunir contre des phénomènes d'érosion interne, le noyau est entouré de couches filtrantes. Une granulométrie spécialement étudiée est utilisée entre la taille très petite des grains d'argile et les grains bien plus grossiers des recharges. Plusieurs couches de filtres successifs sont généralement nécessaires. Les filtres sont décrits dans la section 4.1.

L'épaisseur du noyau dépend (Le Delliou 2003) :

- D'une largeur minimale en crête pour le passage des engins
- De la disponibilité des terres imperméables
- Du gradient hydraulique en contact avec la fondation

Parmi les plus hauts barrages du monde, Nourek au Tadjikistan, est un barrage en remblai zoné qui atteint 304 mètres de hauteur

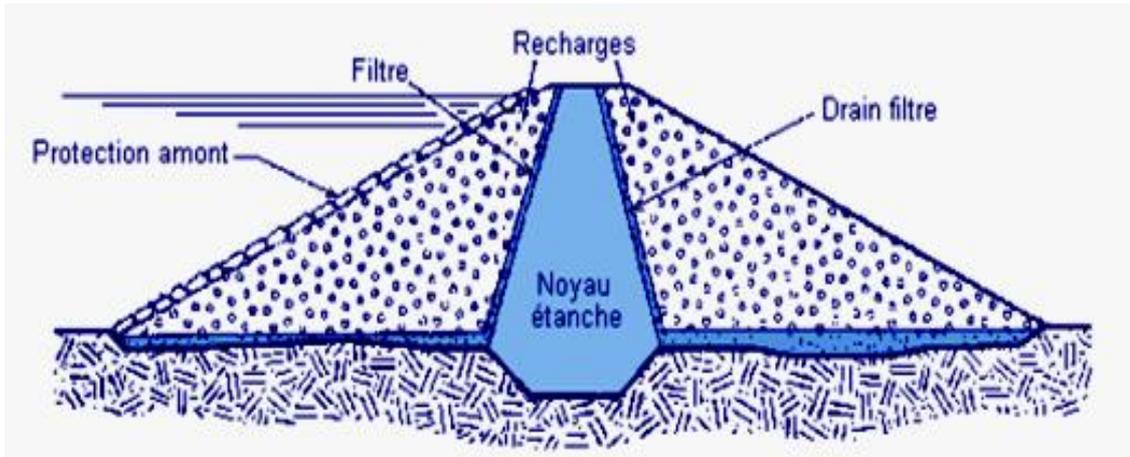
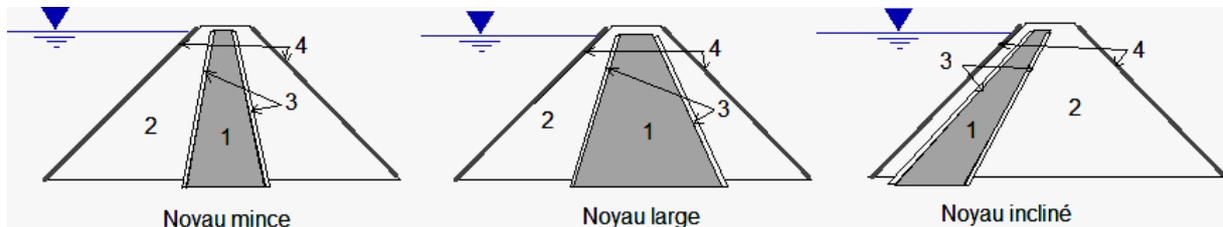


Figure I.5 : Barrage zoné



- 1 : Noyau
- 2 : Recharges
- 3 : Filtres
- 4 : Protection de talus (Rip-rap)

La solution du noyau central mince est choisie lorsque la roche de fondation est peu déformable, imperméable et résistante à l'érosion interne. Ces noyaux minces sont peu pénalisants pour la stabilité des talus.

Dans le cas d'une digue à noyau incliné, le noyau est déplacé vers l'amont, ce qui présente certains avantages comme:

- la possibilité de construire le corps d'appui séparément du noyau (en période de forte pluviométrie) ;
- le noyau est comprimé par la poussée de l'eau ;
- La surélévation du barrage est plus facile à réaliser.

I.4.3. Barrage à masque amont

Il est généralement formé par un massif perméable qui assure la fonction de stabilité. L'étanchéité est obtenue par une couche appelée masque, posée à l'amont du massif. Le masque est étanche sur toute sa surface (Figure I.5). Le record du monde est aujourd'hui détenu par le barrage de Shuibuyaen de Chine avec 233 mètres de hauteur au-dessus des fondations.

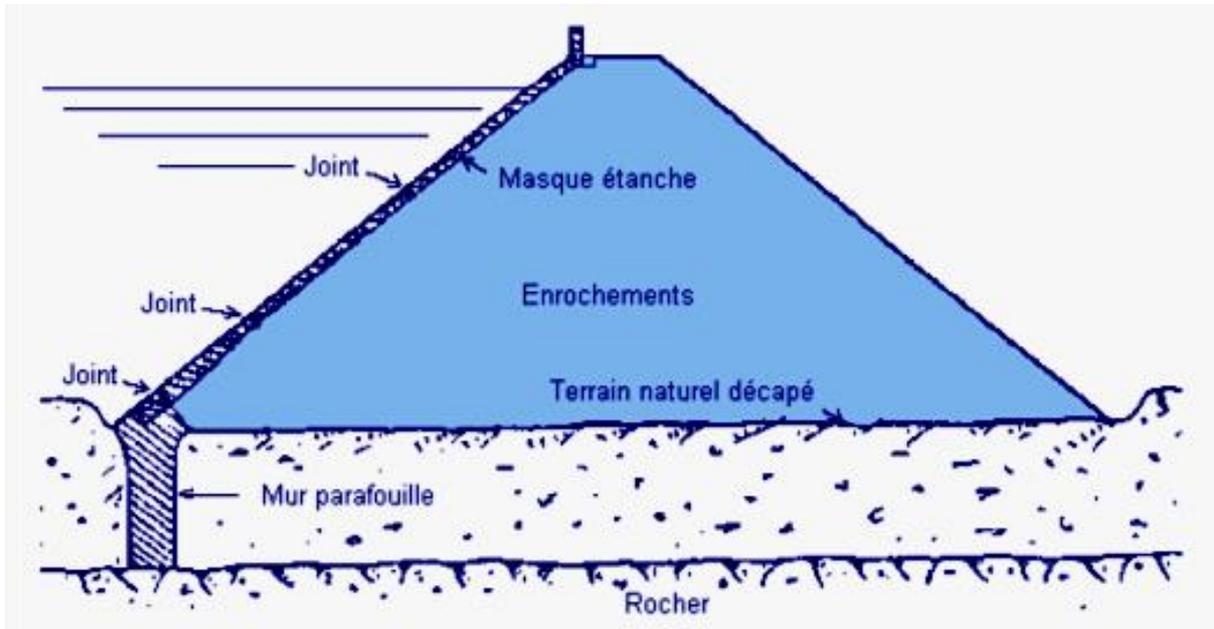


Figure I.6 : Barrage à masque amont

Le masque lui-même peut être réalisé :

- Par une dalle de béton armé coulée par plots successifs sur toute la surface du parement amont (Figure I.6).

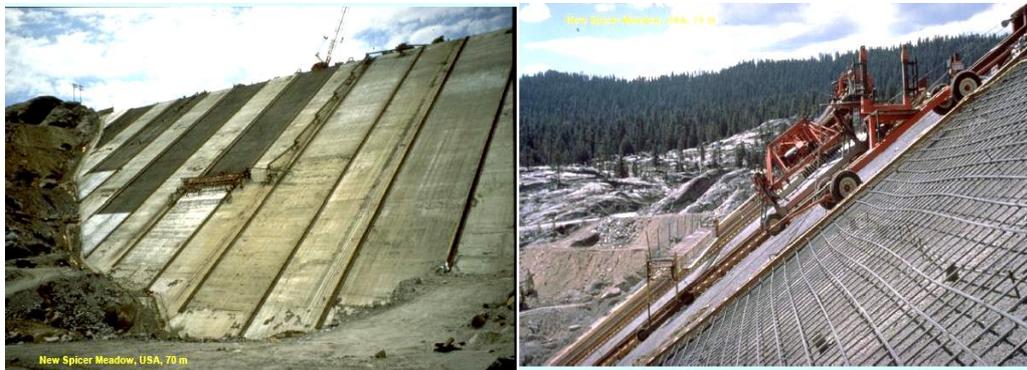


Figure I.7 : Masque en béton armé (barrage New Spicer Meadow, USA)

- Par une ou des couches de béton bitumineux mises en place par des engins routiers adaptés.
- Par des géomembranes (typiquement des feuilles de PVC de forte épaisseur) livrées en lés et soudées les unes aux autres. Les feuilles sont posées sur une couche de transition en matériau fin (pour éviter de déchirer la membrane qui s'appuierait directement sur les enrochements) et protégées par des dalles ou des pavés (Figure I.7).



Figure I.8 : Pose de géomembrane (Barrage de Sar Cheshmeh, Iran)

Le barrage à masque amont présente les avantages suivants :

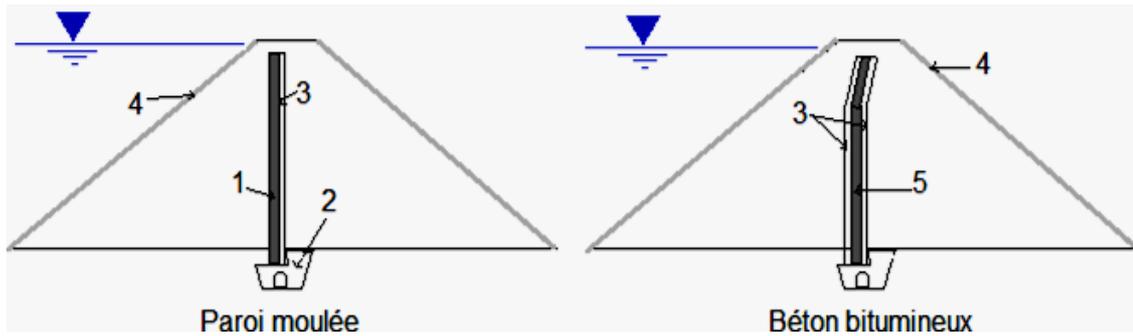
- Le corps d'appui est situé hors d'eau donc pas d'infiltration et pas de variations de pressions interstitielles ;
- La poussée de l'eau s'exerce dans une direction favorable à la stabilité, elle renforce ainsi la résistance au glissement des talus.

Il présente aussi des inconvénients:

- Le gradient hydraulique au pied amont est très élevé, un traitement particulier de la fondation est nécessaire ;
- Le masque est sensible aux sollicitations dynamiques.

I.4.4. Barrage à membrane centrale

La solution d'un barrage avec membrane centrale est à envisager lorsque le matériau nécessaire au noyau n'est pas disponible à proximité du site. Deux types de membranes sont généralement mises en œuvre (Figure I.8) :



1 : membrane (Bentonite + ciment) 2 : Galerie d'injection 3 : Zones de transitions 4 : Protection de surface
5 : Membrane bitumineuse

Figure I.9 : Barrages en remblai avec membranes centrales.

Les principaux paramètres à prendre en compte dans le choix du site et du type de barrage sont les suivants :

- La topographie.
- Les apports du bassin versant.
- La morphologie de la vallée.
- Les conditions géologiques et géotechniques.
- Le contexte météorologique et le régime des crues.
- Les apports moyens en eau et leurs fluctuations saisonnières.
- Les caractéristiques.
- Les risques sismiques.

I.5. Facteurs influençant la conception et la réalisation des barrages en remblais

La conception et la réalisation des barrages en remblai doit tenir compte de plusieurs aspects tels que :

- La disponibilité des matériaux

La construction d'un barrage en remblai nécessite la mise en place de grandes quantités de matériaux. Les zones d'emprunt devront donc se trouver le plus près possibles du lieu d'exécution pour optimiser les coûts de réalisation. La quantité et la qualité des matériaux localisés au niveau du site de l'ouvrage influencent fortement le type de barrage et le mode de construction.

- Type de fondation

La topographie et la nature du terrain de fondation aura une influence sur la conception du barrage en terre. Une fondation rocheuse perméable implique la nécessité d'injection pour remédier aux problèmes de perméabilité, de fissuration et de faille. Un sol mou et perméable implique la nécessité d'utilisation de tapis d'étanchéité, de réaliser des talus de pente plus douce pour élargir le flux de filtration, réduire les débits et remédier aux problèmes de tassements (Figure I.9).

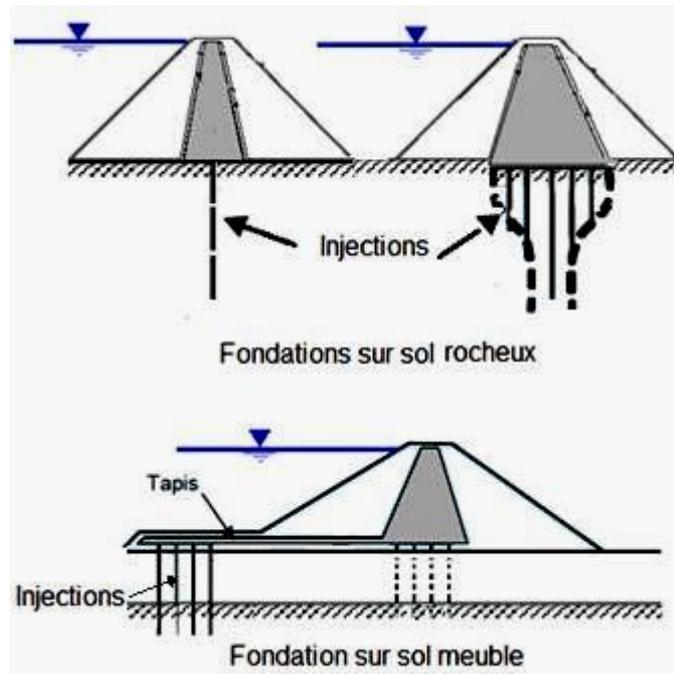


Figure I.10 : Influence de la fondation sur la conception du barrage (Schleiss, A. J. 2004)

- Action des vagues

Le recouvrement du talus de la digue doit être dimensionné pour palier à l'action des vagues. On peut aussi choisir le site de réalisation de sorte qu'il soit protégé du vent et diminuer ainsi l'effet des vagues.

- Climat

Les conditions climatiques ont une forte influence sur le délai d'exécution des ouvrages en terre. La teneur en eau étant le critère le plus important dans le compactage optimal des matériaux, les travaux sont souvent interrompus dans les zones où les précipitations sont élevées. Dans ces zones, la conception de digue avec un noyau incliné ou avec un volume minimal de matériaux argileux est préférable.

- Séismicité

De part leurs capacités à supporter les grandes déformations, les barrages en remblai sont les plus résistants aux sollicitations dynamiques. Néanmoins les barrages situés dans des zones sismiques doivent être conçus avec des talus moins abrupts, des crêtes plus larges, des filtres et des drains plus importants.

I.6. 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.

Chapitre 2

Etude des infiltrations dans le mur et sa fondation

Chapitre 2 Etude des infiltrations dans le mur et sa fondation

II.1. Introduction

Après l'étude de dimensionnement qui permet de définir le profil général du barrage, on procède à l'étude des infiltrations dans le massif et sa fondation. Ces infiltrations dues à la charge hydraulique créée par le réservoir, ont une influence primordiale sur la stabilité de l'ouvrage. Un pourcentage élevé des accidents recensés des barrages en remblai est relié au phénomène de l'érosion interne suite aux infiltrations.

L'étude d'infiltration permet de déterminer les éléments suivants:

- Ligne desaturation

La ligne de saturation est une ligne suivant laquelle la pression à l'intérieur du massif est égale à la pression atmosphérique, elle sépare la zone humide de la zone sèche. Il est possible de la déterminer par analogie électrique ou l'utilisation de méthodes simplifiées telle que la méthode de Kozeny qui utilise des approximations et des propriétés graphiques du réseau d'écoulement. Sur le plan pédagogique, la méthode de Kozeny permet de se familiariser avec les réseaux d'écoulement. Sur le plan pratique, les méthodes les plus utilisées sont les méthodes numériques qui se sont largement développées.

- Les pressionsinterstitielles

Elles peuvent être déterminées à partir du tracé d'un réseau de lignes équipotentiellles(les lignes équipotentiellles sont des lignes fictives d'égale pression).

- Débit defuite

Ce débit de percolation est un indice de fonctionnement de l'ouvrage, il doit être calculé et contrôlé en continue.

II.2. Détermination de la ligne de saturation par la méthode deKozeny

II.2.1. Ligne de saturation pour barrage homogène sans drain sur sol imperméable

Kozeny a montré que, dans un barrage en terre homogène non drainé, la ligne de saturation peut être assimilée dans sa partie médiane à une parabole d'axe horizontal dont le foyer O est situé au

pied du parement aval du barrage (Figure V.1). L'équation de cette parabole s'écrit (Rolley, Kreitmann et al. 1977):

$$y^2 - y_0^2 - 2xy_0 = 0 \quad (\text{II.1})$$

$$y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d \quad (\text{II.2})$$

Avec

Cette ligne de saturation doit être corrigée au droit du parement amont et aval du barrage.

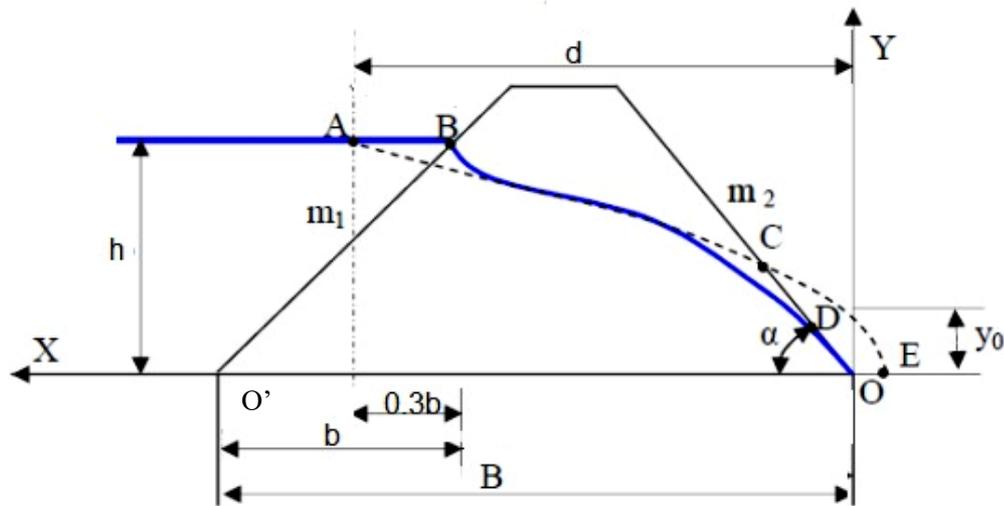


Figure II.1 : Ligne de saturation pour barrage homogène sans drain sur sol imperméable

Les étapes suivantes permettent la détermination graphique de la ligne de saturation pour un barrage homogène reposant sur une fondation imperméable sans drain :

Dessinez la section du barrage en terre et le niveau d'eau en amont (h). Le point B est le point sur le talus amont qui coïncide avec le niveau d'eau (Figure II.1) ;

Soit b la distance qui correspond à la projection horizontale de $O'B$. Repérez le point A à une distance de $0,3b$ du point B sur la surface de l'eau ;

Le foyer de la parabole de Kozeny se situe au pied aval du barrage, au point O. Choisissez O comme origine des axes X Y ;

A l'aide de l'équation IV.3, tracer la courbe de Kozeny en fixant les valeurs des ordonnées y (par exemple $0,2H$, $0,4H$... H) et en calculant les abscisses x ;

Pour obtenir la ligne de saturation à partir de la parabole de Kozeny, on procède à une correction

au droit du parement amont et du pied aval;

Correction en amont : on raccorde la ligne de saturation au point B du plan d'eau amont par une courbe normale au parement amont en B et tangente à la parabole;

Correction en aval : on fait aboutir la ligne de saturation en un point D telque

$$OD = \frac{2}{3} OC \quad (\text{II.3})$$

On peut aussi trouver le point D avec la relation suivante :

$$OD = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \quad (\text{II.4})$$

V.2.2. Ligne de saturation pour un barrage homogène avec drain

En général, les barrages en terre sont munis de drain pour rabattre la ligne de saturation à l'intérieur du barrage. Dans ce cas, la ligne de saturation est déterminée de la manière suivante (Figure V.2):

- Dessinez la section du barrage en terre et le niveau d'eau en amont (h). le point B est le point sur le talus amont qui coïncide avec le niveau d'eau.
- Soit b la distance qui correspond à la projection horizontale de O'B. Repérez le point A à une distance de 0,3b du point B sur la surface de l'eau.
- Le foyer de la parabole de Kozeny se situe au pied amont du drain au point F (l'abscisse du point A est d). Choisissez F comme origine des axes XY.
- Localiser le point G situé à y_0 de F
- A l'aide de l'équation V.1, tracer la courbe de Kozeny en fixant les valeurs des ordonnées y (par exemple 0,2H, 0,4H... H) et en calculant les abscisses x;
- Pour obtenir la ligne de saturation à partir de la parabole de Kozeny qui va du point A jusqu'au point qui se trouve à mi distance de FG, on procède à une correction au droit du parement amont seulement.
- on corrige la ligne de saturation au point B du plan d'eau amont par une courbe normale au parement amont en B et tangente à la parabole.

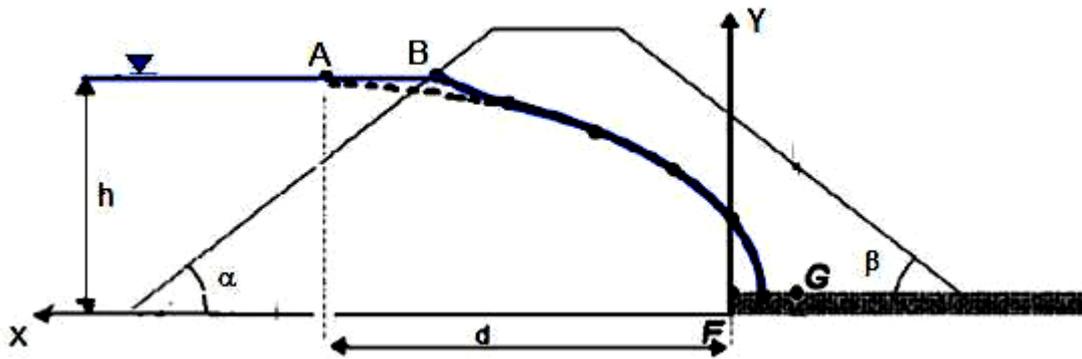


Figure II.2 : Ligne de saturation d'un barrage à drain horizontale

II.2.3. Ligne de saturation pour un barrage à noyau sur fondation imperméable

Dans le cas d'une digue à noyau imperméable épaulée par des zones de recharges perméables (Figure II.3), on construit la ligne de saturation comme dans le cas de la section 2.2.1 en ne considérant que le noyau imperméable (Rolley, Kreitmann et al. 1977)

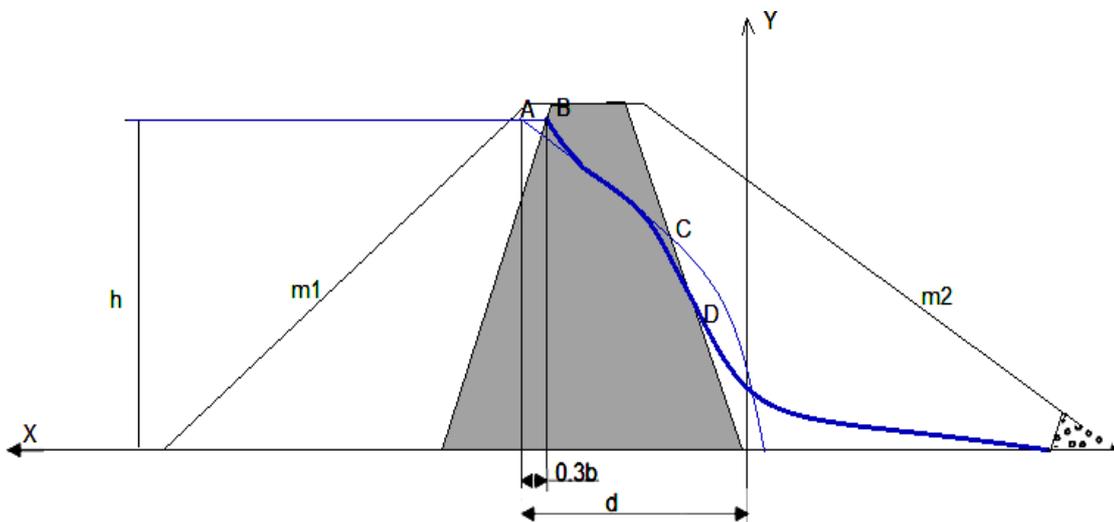


Figure II.3 : Ligne de saturation d'un barrage à noyau

II.2.4. Ligne de saturation pour barrage fondé sur sol perméable

Dans le cas où le sol de fondation est perméable, de perméabilité égale à celle du massif les méthodes de détermination de la ligne de saturation restent applicables, mais les formules donnant le débit ne sont plus valables.

II.3. Notion d'hydraulique du sol.

II.3.1. Charge hydraulique.

Soit un point situé dans un massif saturé siège d'un écoulement permanent, u la pression de l'eau en ce point et z sa cote par rapport à un repère quelconque. La charge hydraulique h en ce point, exprimée en mètre (m), représente l'énergie d'une particule d'eau de masse unitaire :

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z + \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II.5})$$

Comme les vitesses dans les sols sont toujours faibles, le terme $h = \frac{v^2}{2g}$ est négligé.

$$\text{D'où : } h = \frac{u}{\gamma_w} + z \quad (\text{II.6})$$

II.3.2. Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique, i , est la perte de charge hydraulique par unité de longueur. Dans un écoulement quelconque, il est défini par :

$$i = -\overrightarrow{\text{grad}h} = \begin{cases} -\frac{\delta h}{\delta x} \\ -\frac{\delta h}{\delta y} \\ -\frac{\delta h}{\delta z} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Dans un écoulement uniforme et unidirectionnel, il exprime la différence de charge hydraulique entre deux points d'un sol par unité de distance. Soit deux points A et B espacés d'une distance l , h_A et h_B leurs charges hydrauliques respectives, le gradient hydraulique entre ces deux points est

$$i = \frac{h_A - h_B}{l}$$

L'écoulement existe de A vers B lorsqu'il y a présence d'un gradient hydraulique, qui génère un écoulement.

II.3.3. Loi deDarcy

Cette relation fondamentale s'écrit (Schlosser 1988, Degoutte and Royet 1999):

$$V = K.i \quad (II.8)$$

v : vitesse d'écoulement en m/s et K : coefficient de perméabilité en m/s, Le tableau suivant donne un ordre de grandeur de ce paramètre.

Tableau II.1: Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité(Schlosser 1988)

Type de sol	Perméabilité	Ordre de grandeur (m/s)
Argile compacte	Imperméable	10 ⁻⁹ à 10 ⁻¹²
limon	Très faible	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁹
Sables très fin	Faible	10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁷
Petits graviers, sables	Assez élevée	10 ⁻³ à 10 ⁻⁵
Gravier moyens à gros	Très élevée	10 ⁻¹ à 10 ⁻²

Tableau II.2:Quelques valeurs de perméabilité « k » (G. Castagny, 1992)

<i>k</i> en m/s	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
granulométrie homogène	gravier pur			sable pur		sable très fin		limons		argile			
granulométrie variée	gravier gros et moyen		gravier et sable		sable et limons argileux								
degrés de perméabilité	très bonne - bonne				mauvaise				nulle				
type de formation	perméable				semi-perméable				Imperméable				

II.3.4. Forcesd'écoulement

Lorsqu'il y a un écoulement, il y a une perte de charge par dissipation d'énergie par frottements eau/grains du sol. En plus de la poussée d'Archimède, des forces dirigées dans le sens de l'écoulement apparaissent sur les grains du sol.

La figure II.4 montre le bilan des forces s'exerçant sur un volume élémentaire du sol, il correspond à trois forces :

- Le poids : C'est la force verticale descendante $P = \gamma_{sat} \cdot \Delta V$
avec γ_{sat} volumique du sol saturé,
- La poussée d'Archimède: C'est la force verticale ascendante égale à $\gamma_w \cdot \Delta V$
- La force d'écoulement: Dirigée dans le sens de l'écoulement, elle est égale à $i \cdot \gamma_w \cdot \Delta V$

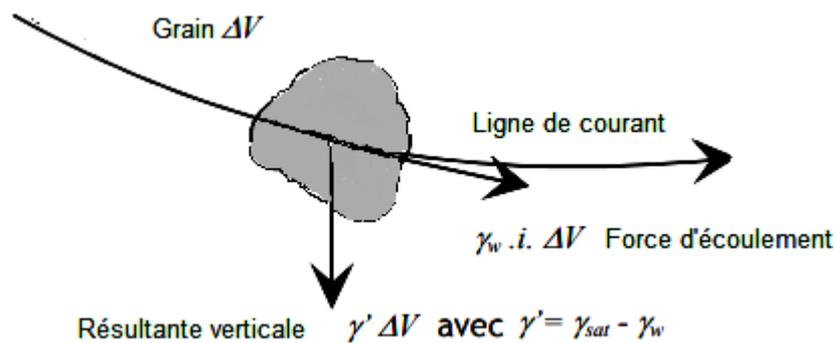


Figure II.4 : Bilan des forces exercées sur un volume élémentaire de sol.

Ces forces d'écoulement sont donc à prendre en compte dans les calculs de stabilité des ouvrages.

II.3.5. Lignes d'équipotentielles et lignes decourant

Un réseau d'écoulement est une représentation graphique d'un champ d'écoulement (Solution de l'équation de Laplace). Sa construction a pour but de connaître en tout point du massif, la charge hydraulique, la vitesse et de déterminer les valeurs des forces d'écoulement ou des débits percolant dans une section donnée. Il existe plusieurs méthodes pour construire ce réseau, la méthode graphique est une solution approchée mais suffisante dans le cas pédagogique qui est le notre. Ce réseau comprend une famille de lignes d'écoulement et d'équipotentielles qui remplissent les conditions suivantes (voir figure II.5) :

- Les lignes d'écoulement représentent les voies d'écoulement des particules d'eau;
- Les lignes d'écoulement et lignes équipotentielles sont orthogonales les unes par rapport aux autres ;

- Le débit entre deux lignes d'écoulement adjacentes est constant (d_q);
- L'écoulement ne peut pas se produire à travers les lignes d'écoulement;
- Une ligne équipotentielle est une ligne reliant des points ayant la même charge hydraulique;
- La vitesse d'écoulement est normale aux lignes équipotentiels;
- La différence de hauteur manométrique entre deux lignes équipotentiels est la perte de charge (Δh);
- Une ligne d'écoulement ne peut pas croiser une autre ligne d'écoulement;
- Une ligne équipotentielle ne peut pas croiser une autre ligne équipotentielle.

Pour tracer un réseau d'écoulement des essais successifs sont effectués. En général, on fixe en premier le nombre de lignes de courant, 3 à 8 lignes sont souvent suffisantes. En fonction de ce nombre sélectionnée, le nombre de lignes équipotentiels sera automatiquement fixé par la géométrie et la disposition de la grille.

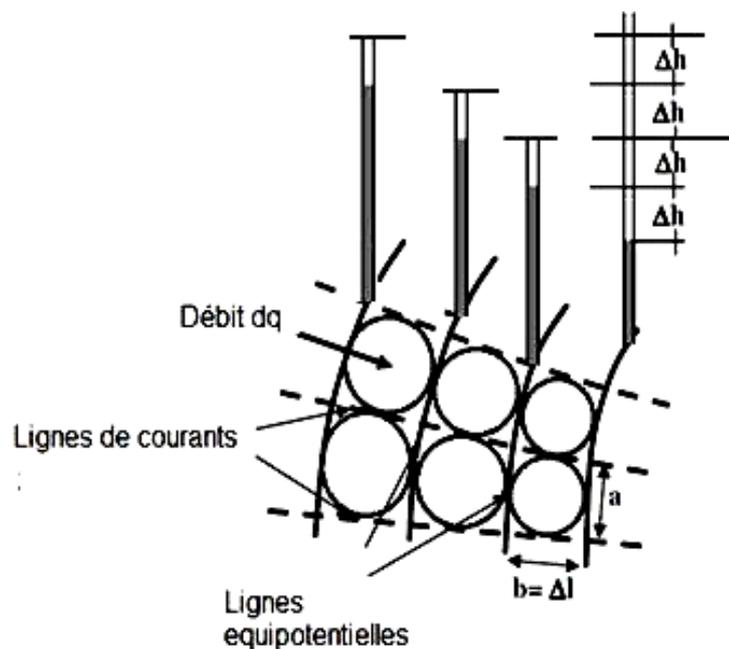


Figure II.5 : Réseau d'écoulement

II.4. Tracé du réseau d'écoulement dans le cas des barrages en remblai par

II.4. 1. La méthode graphique

La solution graphique du problème d'infiltration des barrages en remblai se ramène donc à tracer un réseau de lignes orthogonales, les conditions aux limites étant connues. Dans le cas d'un massif homogène reposant sur une assise imperméable, la ligne de saturation et la ligne au contact massif- assise sont deux lignes de courant. Le parement amont est une équipotentielle

(Figure II.6). Si le massif comporte un tapis drainant, la ligne équipotentielle au coté du drain est une ligne à pression atmosphérique (Figure II.7).

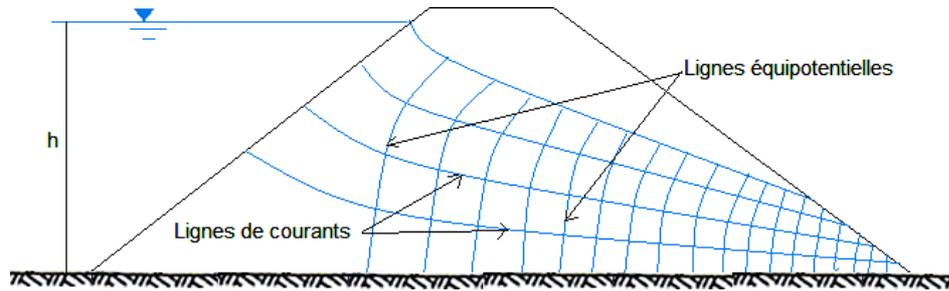


Figure II.6 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène sur sol imperméable sans drain

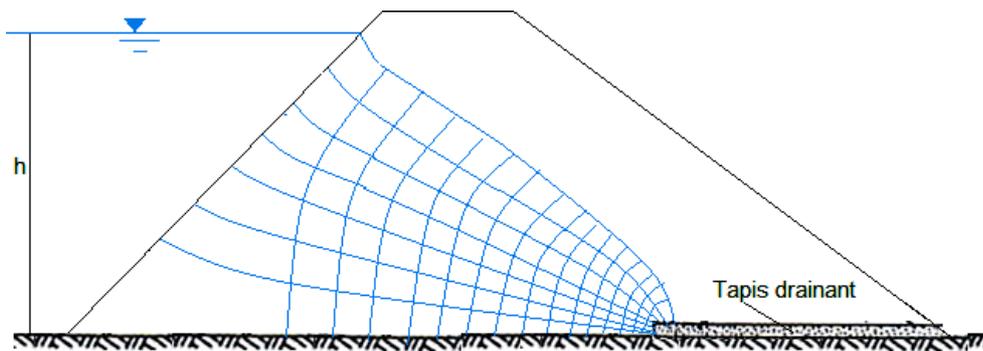


Figure II.7 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol imperméable

Si les terrains d'assise sont perméables sur une hauteur finie avec une perméabilité semblable à celle du massif du barrage, la ligne de saturation et la ligne limitant la partie inférieure de la couche perméable sont des lignes de courants limites constituant les frontières du système considéré (Figure II.8).

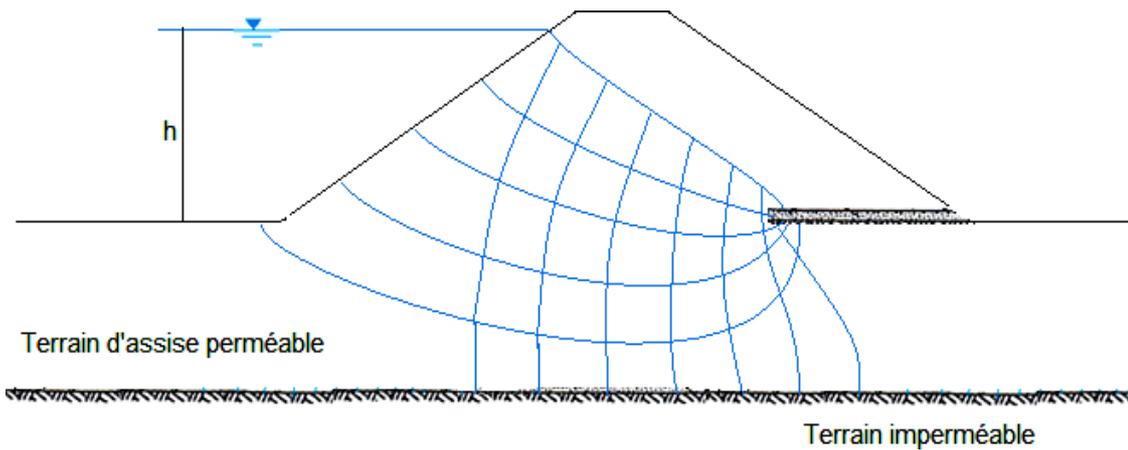


Figure II.8 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol perméable de même perméabilité que le massif

Si l'écoulement se fait à travers des couches de différentes perméabilités, les lignes de courant se réfractent au contact de la surface de séparation des deux couches. Elles se resserrent lorsqu'elles entrent dans un matériau plus perméable ou s'écartent dans un matériau moins perméable (Figure II.9).

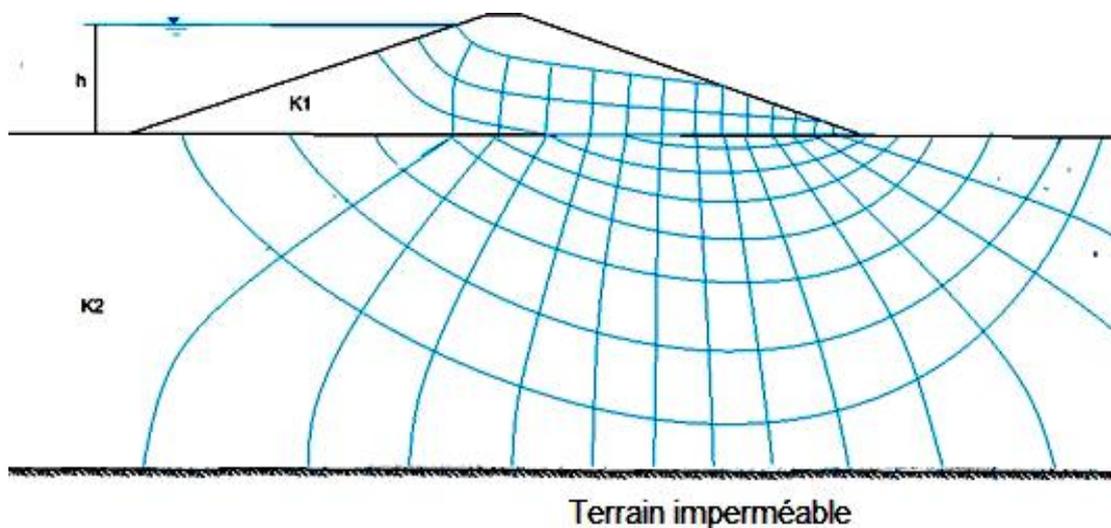


Figure II.9 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de terrain d'assise moins perméable que le massif du barrage ($K_1 > K_2$)

Dans le cas de vidange rapide les lignes se répartissent différemment puisque le parement amont n'est plus une ligne équipotentielle et son potentiel varie en fonction du point considéré (Figure II.10).

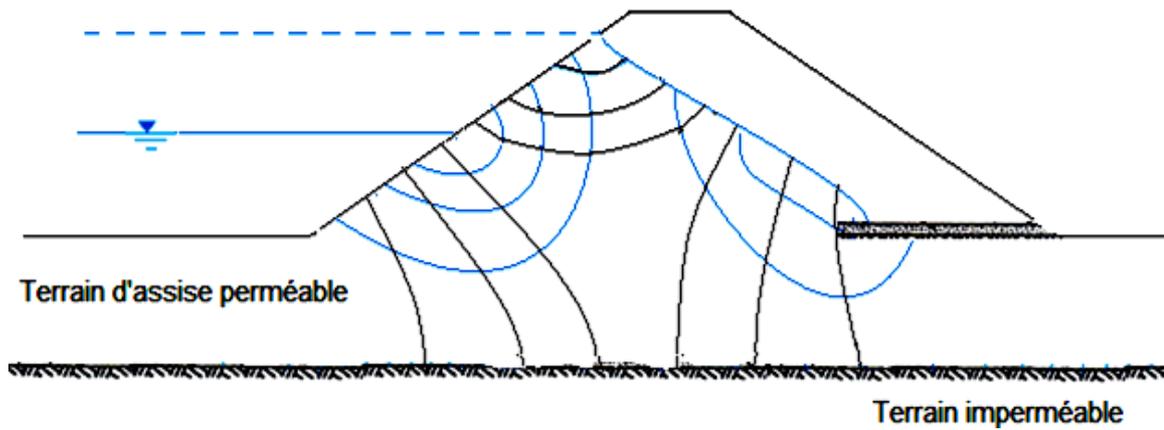


Figure II.10 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas d'une vidange partielle

II.5. Pression de l'eau dans le corps du barrage

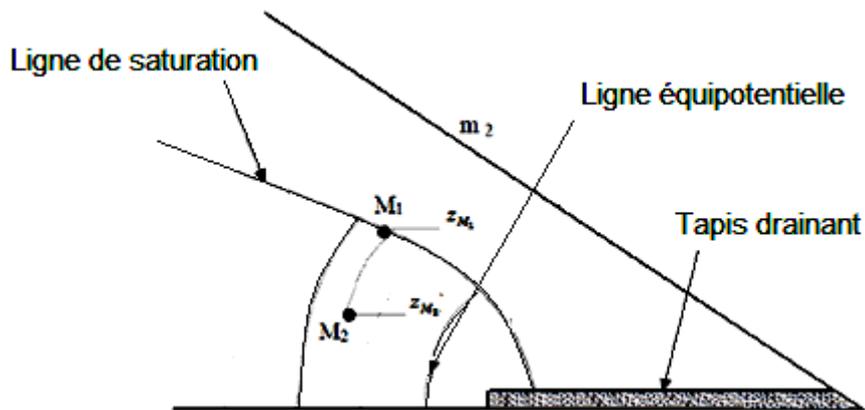


Figure II.11 : Détermination de la pression interstitielle.

Quand on dispose de réseau d'équipotentiellles, il est facile d'en déduire la pression de l'eau en chaque point.

D'après la figure V.11 la charge hydraulique H_{M_2} au point M_2 est égale à :

$$H_{M_2} = \frac{U_{M_2}}{\gamma_w} + Z_{M_2}$$

sont U_{M_2} et Z_{M_2} respectivement la pression de l'eau et la cote du point M_2 par rapport à un plan arbitraire fixé.

$$\text{d'où : } U_{M_2} = (H_{M_2} - z_{M_2}) \gamma_w$$

$$\text{De meme } U_{M_1} = (H_{M_1} - z_{M_1}) \gamma_w$$

$$U_{M_1} = 0$$

et comme (le point M1 se trouve sur la ligne de saturation)

$H_{M_1} = H_{M_2} = z_{M_1}$ alors la pression au point M2 se calcule par:

$$U_{M_2} = (z_{M_1} - z_{M_2}) \gamma_w \quad (\text{II.9})$$

II.6. Débit fuite

La loi de Darcy permet d'évaluer le débit de fuite connaissant le réseau d'écoulement.

D'après la figure V.9 les termes suivants sont définis comme suit :

N_h = Nombre de chutes d'équipotentialité,

N_c = Nombre de canaux d'écoulement,

dq = débit dans un canal d'écoulement (entre deux lignes de courant adjacentes)

Δh = perte de charge entre deux lignes équipotentielle adjacentes

Considérons une maille du réseau de dimension $a \times b$ par unité de largeur tel que : a = distance entre deux lignes de courants,

b = distances entre deux lignes équipotentielles,

La perte de charge est : $\Delta h = \frac{h}{N_h}$ et le gradient hydraulique est : $i = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{\Delta h}{b}$

D'où $i = \frac{h}{b.N_h}$

D'après la loi de DARCY le débit est : $dq = v.S = K.i.S = K.\frac{h}{b.N_h}.a$

Le débit total par unité de largeur sera : $Q = K.\frac{h}{b.N_h}.a.N_c$

En général, les réseaux d'écoulement sont tracés avec: $a = b$

Dans ce cas, le débit total est.
$$Q = K.h \frac{N_c}{N_h}$$

Ce calcul a été effectué par unité de largeur. Pour une digue de largeur L, le débit de fuite total

$$\text{est : } Q = K.h \frac{N_c}{N_h} .L \quad (\text{II.10})$$

La méthode de calcul exposée si dessus est générale. D'autres méthodes tenant compte de l'angle α que fais le talus aval avec l'horizontale et basées également sur la loi de Darcy sont appliquées pour le calcul du débit de résurgence (Rolley, Kreitmann et al. 1977).

$$\text{Si } \alpha < 30^\circ \quad Q = K.b.\sin^2 \alpha \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Avec } b = OD = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Si } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad Q = K.y_0$$

y_0 est l'ordonnée du point de sortie de la surface libre.

II.7. Erosion interne, phénomène de Renard et Boulance

L'érosion interne est l'une des principales causes de rupture des barrages en remblai. C'est un processus qui implique des arrachements de particules et leur transport dans le barrage ou sa fondation " Piping" en Anglais. Elle se produit quand la force de l'écoulement est suffisamment importante pour arracher les particules du massif et les entrainer avec elle. Ceci n'est possible que si les particules du sol sont fines et qu'elles puissent migrer à travers les vides du massif dont la granulométrie n'est pas uniforme. Si la hauteur de charge est suffisante pour permettre à l'eau de s'infiltrer à des vitesses capable d'entraîner les particules, un passage préférentielle se forme allant en grandissant jusqu'à rupture de l'ouvrage (Figure II.12).

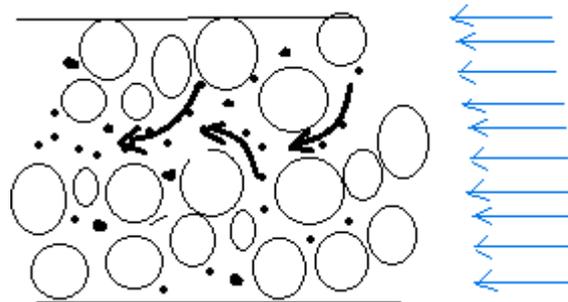


Figure II.12 : Erosion interne

Le phénomène de Boulance se produit quand l'écoulement est ascendant et la pression de l'écoulement avec la poussée d'Archimède arrivent à annuler le poids des particules du sol. Ceci n'est en général possible que si le sol est fin et pulvérulent. En s'opposant au poids des grains cette composante peut atteindre des valeurs qui permettent aux grains de flotter (Figure II.13).

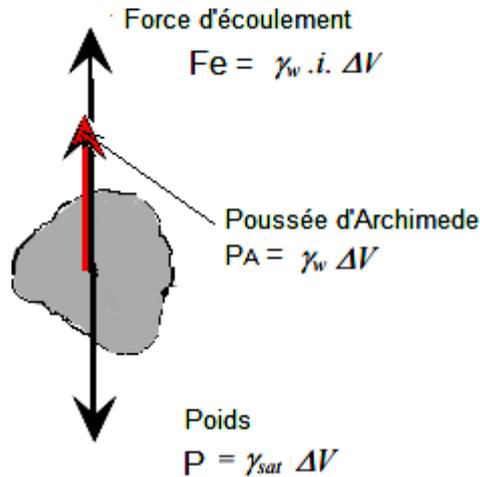


Figure II.13 : Phénomène de Boulance

Ce phénomène se produit dans un écoulement si le gradient hydraulique i est vertical ascendant, les grains sont alors entraînés par l'eau. On définit le gradient hydraulique critique, i_c , pour lequel la résultante des forces est nulle et donc les grains du sol à la limite d'être entraînés :

A la limite $P = P_A + P_e$ d'où $\gamma_{sat} \cdot \Delta V = \gamma_w \cdot \Delta V + i_c \cdot \gamma_w \cdot \Delta V$

$$i_c = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (\text{II.13})$$

Pour les barrages en terre, le risque de Boulance existe si les fuites se produisent d'une manière importante à travers le sol de fondation.

II.8. Méthodes de prévention

Pour empêcher l'érosion interne en fondation d'un barrage, il faut réduire le gradient hydraulique le long de la ligne de cheminement. Comme la hauteur d'eau H est imposée, c'est la longueur L des cheminements qui est le paramètre essentiel. LANE distingue les cheminements

verticaux L_V des cheminements horizontaux L_H . Sa règle empirique généralement utilisée pour le calcul des fondations de barrages s'écrit (Rolley, Kreitmann et al. 1977):

$$L_V + \frac{L_H}{3} \geq C.H \quad (\text{II.14})$$

Le paramètre C est un coefficient dont les valeurs minimales varient suivant la nature du terrain (Tableau V.2).

Tableau II.3: Coefficient de LANE en fonction de la nature de terrain (Rolley, Kreitmann et al.1977)

Nature du terrain	C
Sables fins et limons	8.5
Sables fins	7
Sables moyens	6
Gros sables	5
Petits graviers	4
Gros graviers	3
Mélange de gravier et de gros galets	2.5
Argile plastique	3
Argile consistante	2
Argile dure	1.8

Pour prévenir l'érosion interne dans un barrage en terre, des précautions doivent être prises pendant de la construction pour maîtriser les gradients d'écoulement et empêcher l'expulsion des fines.

II.9. Conclusion

L'infiltration des eaux à travers le corps du barrage ou sa fondation, est un phénomène qui est dû au gradient hydraulique et au coefficient de perméabilité. L'écoulement gravitaire de ces filets d'eaux entraînant avec lui les particules fines du sol. Ainsi, sous l'effet de pression elle forme un petit tunnel qui est dévastateur pour l'ouvrage et un danger pour sa stabilité.

La perméabilité dans un barrage en terre existe toujours, même si les pertes d'eau par infiltration sont faibles et pour déterminer ces infiltrations, il est impératif d'évaluer la ligne de saturation et le débit de fuite de l'eau par infiltration.

Chapitre 3

Disposition de drainage dans les barrages en terre

Chapitre 3 Disposition de drainage dans les barrages en terre

III.1. Dispositifs de protection contre les effets de l'eau

III.1.1. Introduction :

Sous la charge hydraulique créée par le réservoir, l'eau va tendre à s'infiltrer vers le potentiel inférieur à l'aval engendrant plusieurs problèmes comme l'entraînement des particules de sol, la diminution de la stabilité due aux pressions d'écoulement et les pertes d'eau. Le contrôle des infiltrations constitue donc un des principaux éléments de conception des barrages en remblais. Plusieurs approches sont à envisager et d'une manière combinée telles que :

- La protection au moyen de filtre pour se prémunir contre l'érosion interne dans le mur du barrage et dans la fondation;
- La réduction des infiltrations (débit et pression) par des éléments de conception tel l'allongement du chemin d'écoulement ;
- Dissipation des pressions d'eau de façon contrôlée au moyen de drains ou de puits de drainage.

Pour contrôler les infiltrations à travers le remblai, il est nécessaire de mettre en place un dispositif drainant et filtrant.

III.1.2. Nature des matériaux granulaires (Règle de filtre)

Sous l'effet de la circulation de l'eau, les particules de sol peuvent migrer vers une zone de sol plus grossier. C'est par exemple ce qui peut se produire entre le remblai d'un barrage et le matériau drainant. Pour l'éviter, deux zones successives d'un ouvrage hydraulique doivent vérifier des conditions de filtre qui sont des règles granulométriques.

En pratique, les conditions de filtre ne sont pas faciles à respecter entre ces deux matériaux et l'on interpose, le plus souvent, un matériau de granulométrie intermédiaire, appelé filtre. Les conditions explicitées ci-après doivent être vérifiées aux deux interfaces : entre matériau fin du remblai et filtre puis entre filtre et drain. Dans chaque cas, D désigne la taille des grains du matériau le plus grossier et d celle des plus fins.

Lorsqu'un matériau fin à granulométrie continue est en contact dans un ouvrage hydraulique avec un matériau uniforme (drain ou filtre), leurs granulométries doivent répondre aux conditions suivantes :

- Condition de non entraînement des fines : $D_{15} < 5.d_{85}$;
- Condition de perméabilité : $D_{15} > 0.1 \text{ mm}$;
- Coefficient d'uniformité des filtres et des drains compris entre 2 et 8.

On impose aussi le plus souvent une condition de propreté pour le matériau constitutif d'un drain, condition qui s'écrit par exemple $D_{05} > 0.08 \text{ mm}$.

- La condition de filtre au contact entre deux matériaux très uniformes ($D_{60}/D_{10} < 3$ et $d_{60}/d_{10} < 3$), ce qui est le cas entre le filtre et le drain, s'écrit : $5.d_{50} < D_{50} < 10.d_{50}$.
- Pour réaliser le drain vertical d'un petit barrage en terre, il est habituel de recreuser plusieurs couches du matériau fin compacté pour y déverser un sable considéré comme drainant et auto filtrant (pas de filtre entre ce sable et le matériau du remblai). On recommande dans ce cas de choisir un sable 0-5 mm vérifiant : $D_{05} > 0.08 \text{ mm}$ (propreté) et $D_{15} > 0.1 \text{ mm}$ (perméabilité).
- Enfin, un sol très gradué ($d_{60}/d_{10} > 16$) et à granulométrie discontinue présente des risques d'érosion interne de sa partie fine sous l'effet des circulations d'eau. Le filtre contigu à ce matériau doit donc être déterminé avec le d_{85} de la partie inférieure de la courbe granulométrique du sol, après le changement de pente (figure III.1) (G.Degoutte & P.Royet, 2005).

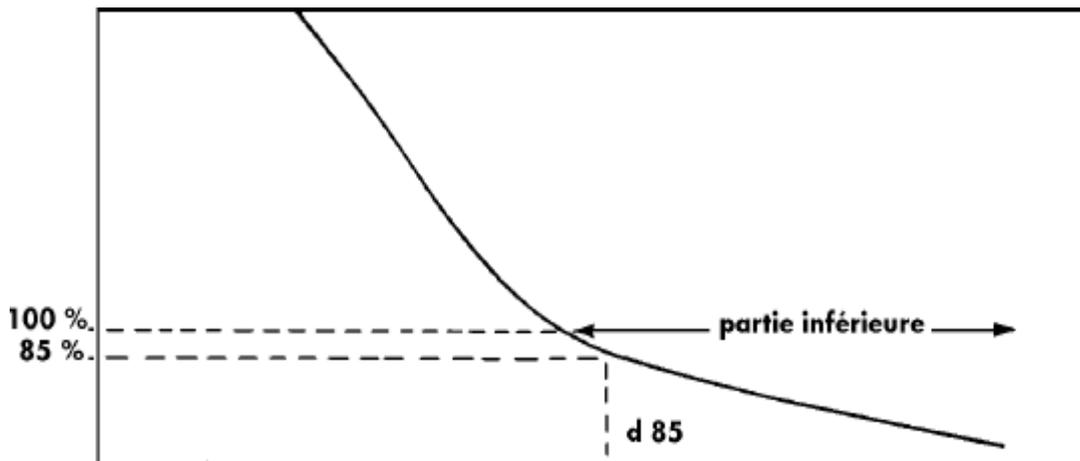


Figure III.1 : Exemple d'un sol très gradué.

III.2. Dispositifs drainants dans un barrage en terre

La construction des barrages en terre exige dans la plus part des temps la construction des dispositifs de drainage afin d'évacuer les eaux infiltrées et de protéger le talus aval contre les sous pressions et l'érosion. Le rôle d'un drain est d'éviter la surface de suintement et avoir un débit minimum (F.Marcel 1977, M.Cassan 1994, G.Schneebeli 1987).

Le choix du type de drain dépend de plusieurs facteurs tels que :

- La hauteur du barrage.
- La perméabilité de la fondation.
- La disponibilité du matériau.

- Le coût du matériau.

Comme la plupart des ouvrages, les dispositifs de drainage nécessitent un entretien régulier qui, s'il n'est pas réalisé, peut leur enlever toute efficacité.

III.3. Drains et filtres dans les barrages en terre

"Les ruptures réellement catastrophiques sont celles dues aux érosions internes par infiltrations ou renards, du fait qu'elles se produisent sans avertissement, le réservoir étant plein, parfois plusieurs années après le premier remplissage" (Terzaghi).

Ces infiltrations dangereuses, qui finissent par produire une érosion interne du barrage ou des fondations, peuvent avoir des origines très diverses :

- fissuration due à des tassements différentiels,
- fuites à travers la fondation, au contact avec le noyau ou le pied de masque,
- fissuration horizontale due à des transferts de charge du noyau sur les massifs amont et aval et à un claquage ou fracturation hydraulique des zones peu comprimées,
- entraînement de fines à la suite d'élongation et de rupture de tuyaux enterrés,
- tassements différentiels près d'une faille, d'une fondation compressible érodable.

L'hétérogénéité des remblais et de la fondation peut entraîner des variations de perméabilité importantes à l'intérieur d'une même zone. L'anisotropie des remblais compactés par couches minces est bien connue (K_h/K_v).

Pour contrôler et réduire les pressions interstitielles afin d'améliorer la stabilité globale, on organise l'architecture interne du remblai avec des zones de forte perméabilité appelées drains. On trouvera ainsi, classiquement :

le drain cheminée, placé quasi verticalement vers le centre d'un remblai homogène, ou à l'aval du noyau, épais de l'ordre de 3 m pour des raisons constructives,

Le tapis drainant aval, qui couvre la moitié aval de la fondation et sert d'exutoire au drain cheminée (et de drain vis à vis des eaux présentes en fondation), épais de 50 cm au moins,

Le drainage particulier autour des conduites sous remblai, qui s'impose.

La capacité de ces drains doit être suffisante pour leur permettre d'absorber, sans mise en pression sensible, les débits provenant non seulement de la percolation normale à travers le noyau et la fondation, mais aussi les fuites accidentelles pouvant provenir d'une fissuration du noyau (créée par fracturation hydraulique ou tassement différentiel), ou d'un collage imparfait entre le noyau et sa fondation ou tout autre organe : les drains sont des organes de sécurité. Leur débitance est calculable, et doit être vérifiée.

Il faut protéger les drains par des filtres, pour empêcher le sol de se déplacer : si on plaçait les drains directement au contact des matériaux à granulométrie fine comme la terre à noyau (ou certaines fondations), l'eau en écoulement entraînerait les particules fines à travers les vides intergranulaires du drain et l'on obtiendrait une érosion interne nommée renard.

Le phénomène de renard est d'autant plus dangereux qu'il est auto-accélééré : le début de l'érosion augmente la perméabilité, donc augmente la vitesse de l'eau, ce qui accroît la vitesse d'érosion. Une amorce de renard, même très tardive, peut difficilement être stoppée si elle n'est pas traitée dès les premiers symptômes. Grain après grain, un matériau érodable peut être emporté avec le temps.

La solution préventive consiste à disposer des filtres entre des matériaux à granulométries trop contrastées : ce sont des matériaux de granulométries intermédiaires, choisies de telle sorte que les grains du matériau fin amont ne puissent pas pénétrer les vides intergranulaires du matériau filtre, et ainsi de suite : que le filtre ne puisse pas pénétrer les vides du matériau drain, ou que le filtre fin ne puisse pas pénétrer les vides du filtre grossier, lequel devra ne pas pénétrer les vides du drain si celui-ci est très ouvert.

Une difficulté particulière tient à ce qu'il ne faut pas se laisser entraîner à placer un filtre trop fin au contact d'une argile, au point qu'il en serait cohérent et donc fissurable : ce que justement l'on cherche à éviter lorsqu'il s'agit de protéger un noyau de barrage en terre.

Un filtre doit non seulement être dimensionné en fonction du matériau à soutenir, il doit aussi pouvoir être mis en place de façon homogène, sans ségrégation. Pour cela, sa granulométrie doit être assez étroite. De plus, au contact des rives et des ouvrages en béton, lieux propices à un surcroît de ségrégation, les épaisseurs de filtres seront systématiquement augmentées.

En pratique, on place toujours un filtre entre le noyau et son drain cheminée aval, et parfois aussi entre le drain et la recharge aval. Des filtres sont également à prévoir au contact entre le remblai et la fondation, lorsque la granulométrie de celle-ci apparaît critique vis-à-vis des règles précitées.

On peut enfin en placer le long de la face amont du noyau, pour éviter la migration de fines vers l'amont à l'occasion des baisses du plan d'eau.

En cas de risque sismique, un filtre fin spécial sans cohésion est souvent ajouté sur l'amont du noyau, dans la partie haute du barrage, comme réserve de produits d'obturation d'éventuelles fissures du noyau.

Un filtre peut agir comme drain, jusqu'à un certain point ; mais le drain ne peut jouer le rôle de filtre.

III.3.1. Classes des filtres

Les filtres peuvent être classés en plusieurs catégories :

- Classe 1 (Filtres de drainage) : Filtres dont le but est d'intercepter et de transporter les infiltrations principales au sein d'un barrage et de sa fondation. Ces filtres peuvent avoir à éliminer de grandes quantités d'infiltration pour les barrages sur des fondations perméables ou des barrages de mauvaise construction. De matériaux uniformément classés, typiquement en deux étapes. Le filtre doit répondre aux exigences tant pour le mouvement des particules que pour le drainage. Les drains tombent typiquement dans cette catégorie,
- Classe 2 (Filtres de protection) : Filtres dont le but est de protéger le matériau de base contre l'érosion dans d'autres zones de remblai et de fournir une certaine fonction de drainage afin de contrôler la pression interstitielle dans le barrage. Ces filtres sont typiquement uniformément classés et en plusieurs étapes, Peuvent également être classés en grande partie et dans l'intérêt de réduire le nombre de zones pour faire la transition vers le matériau de base. Cette classe comprend les cheminées, les couvertures et les zones de transition sur le côté aval d'un barrage,
- Classe 3 (Filtres d'étranglement) : Filtres dont le but est de soutenir le remplissage sus-jacent (le matériau de base) de se déplacer dans des fondations de travail perméables ou ouvertes. Ces filtres sont typiquement largement classés et ont une exigence seulement pour arrêter le mouvement de particules. Il n'y a aucune exigence de perméabilité,
- Classe 4 (bouchons de fissure sismique) : Filtres dont le but est de protéger contre les fissures qui peuvent se produire dans le noyau de remblai, en particulier causées par une charge sismique et / ou de grandes déformations. Les dimensions de cette classe de filtre sont contrôlées par déplacement prévu (horizontal ou vertical). Bien qu'il n'y ait aucune exigence de perméabilité pour ce type de filtre, il doit être relativement exempt de fines, de sorte que la zone elle-même ne subisse pas de fissures (FEMA, 2011).

III.3.2. Rôle des filtres

Parmi leurs rôles :

- entreposés entre deux couches à granulométrie différentes, ils évitent que les grains fins de la première couche ne soient entraînés par les eaux d'infiltration à travers les matériaux de gros diamètres,
- entreposés de part et d'autre d'un noyau d'étanchéité ou sous un écran d'étanchéité, ils jouent le rôle de couches drainantes en évacuant les eaux d'infiltration vers l'aval du

barrage,

- Intercalés entre un massif de barrage et sa fondation, si elle est argileuse, contribue à activer sa consolidation grâce à leur rôle drainant qui réduit les pressions internes,
- Permettre le passage de l'eau vers le conduit de drainage,
- Empêcher le passage des particules dans le conduit de drainage.

III.3.3. Dimensionnement des filtres

Un filtre ne doit ni se dégrader par l'entraînement de ses éléments, ni se colmater. Il est conseillé pour cela d'utiliser des sables dont le coefficient d'uniformité C_u est inférieur à 2 :

$$(D_{60}/D_{10}) < 2$$

Les conditions à respecter sont, d'après (TERZAGUI) :

Granulométrie étroite : $5 < D_{15}/d_{85} < 10$,

Granulométrie étalée : $D_{15}/d_{85} < 4$ ou 5 (condition d'entraînement des grains), $D_{15}/d_{15} > 4$ ou 5 (condition de perméabilité),

$D_{50}/d_{50} < 25$ (parallélisme des courbes),

Dans le cas de drainage à tubes perforés : $D_{85}/\text{Diamètre ouverture} > 2$.

Avec :

D : Diamètre de filtre.

d : Diamètre du matériau de base.

La pente de la droite (courbe granulométrique) du filtre doit être la même que celle du matériau à filtrer. La même remarque est valable pour un fuseau,

L'épaisseur des couches du tapis filtrant T doit vérifier la condition suivante :

$$T \geq (5 \text{ à } 7) \times d_{85}$$

L'épaisseur pratique doit être au moins de 20 à 30 cm et en tout cas supérieure ou égales à 50 fois le D_{15} ,

Quand une couche filtrante sert de drain, elle doit permettre l'évacuation d'un débit double du débit à drainer. Si elle contient des drains, ils doivent être de diamètre inférieur à 0.5 fois D_{85} .

Fuseau des matériaux à filtrer

Caractéristiques du fuseau des matériaux filtrants $5 D_{15} < F_{15} < 5 D_{85}$ Avec coefficient d'uniformité $D_{60}/D_{10} > 2$

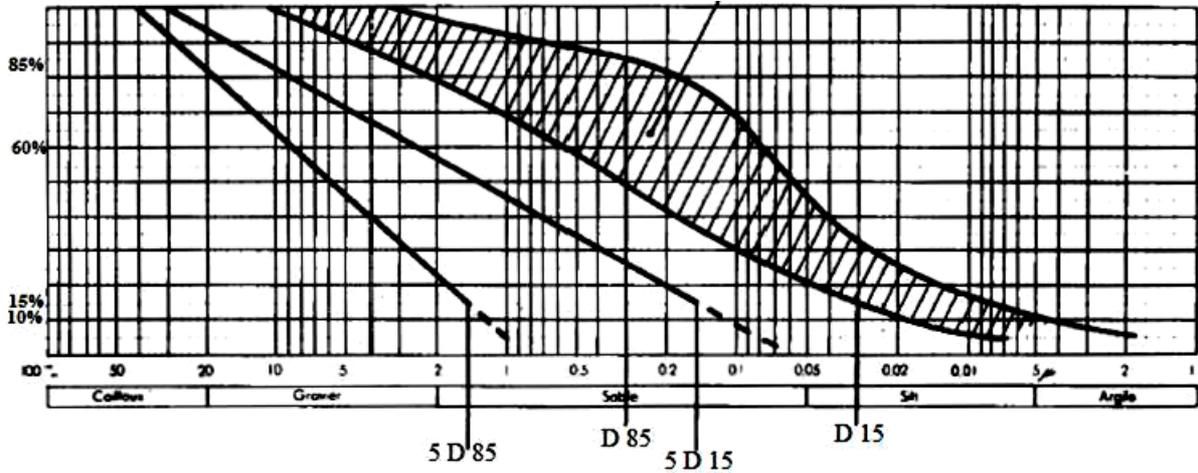


Figure III.2 : Granulométrie d'un filtre (Rolley et al, 1994).

Les filtres sont conçus pour bloquer les grains entre deux zones de granulométries différentes et avoir une perméabilité donnée afin d'éviter la formation des poussées hydrostatiques. Ils doivent être choisis en fonction des critères suivants (Sherrard et al, 1984) :

- Assurer un état non cohérent, c'est-à-dire ayant une propriété d'autocolmatage en cas de fissures probables,
- Contrôler les écoulements en cas de fuites concentrées, surtout dans le cas d'un filtre critique comme celui de la partie aval du noyau.

Il a été montré dans le cas du filtre en sable et en gravier dense (Sherrard et al, 1984), qu'il existait entre la perméabilité et le diamètre la relation suivante :

$$K = 0,35 \cdot (D_{15})^2 \quad \text{applicable pour} \quad k \geq 10^{-5} \text{ m/s}$$

D'après (Sherrard et al, 1984), l'emploi du D_{50} dans le cas du filtre en sable et en gravier n'a aucune base théorique ni expérimentale. L'utilisation de la condition concernant le rapport (D_{50}/d_{50}) favorise la ségrégation durant la mise en place. De même, la condition sur le rapport (D_{15}/d_{15}) n'a aucune influence sur les propriétés des filtres voulus.

D'une manière générale, il est toujours recommandé que les filtres soient bien gradués et présentent une continuité dans leurs granulométries. Ils doivent être assez épais pour que leurs exécutions restent faciles et leurs continuités assurées en cas de déformation hétérogène.

Lors de la mise en place des filtres, il est recommandé :

- D'éviter la ségrégation pouvant survenir dans le cas d'un matériau grossier à

granulométrie très étendue,

- D'avoir une teneur en eau de mise en place proche de la saturation.

Pour les filtres entourant le noyau, il est conseillé de les mettre en place avant la levée correspondante au noyau.

Conditions de rupture des filtres :

- $d_{85} < 0,10.D_{15}$ à $0,11.D_{15}$ (Betram, 1940), $d_{85} < 0,11.D_{15}$ (Lund, 1949),
- $d_{85} < 0,10.D_{15}$ à $0,12.D_{15}$ (Sherrard, 1984).

Pour des matériaux de base présentant des fuseaux, la procédure de détermination des fuseaux de filtres est similaire au cas précédent. Les mêmes règles seront adoptées en considérant les deux courbes enveloppes du fuseau.

La première courbe enveloppe (limite inférieure) du matériau de base servira à la détermination de la courbe inférieure du filtre. La même démarche est adoptée pour la courbe enveloppe supérieure.

III.3.4. Les drains

Définition

Le drain est un organe fortement perméable incorporé dans le barrage en terre. Il est destiné à évacuer les eaux infiltrées à travers le massif et doit être protégé par un filtre.

Il est généralement constitué de graviers et d'embrochements ayant une forte perméabilité avec des caractéristiques de non altération au contact de l'eau et résistant aux grandes compressions.

La fonction du drainage est d'intercepter les débits d'infiltration afin d'éviter que leur résurgence incontrôlée à l'aval ne nuise à la stabilité de l'ouvrage (sous pressions, renardage, etc.). En outre, la canalisation par le drainage des débits de fuite va permettre d'en faciliter la surveillance et le contrôle (Royet et al, 1999).

III.3.5. Rôles des drains

- Éliminer l'excès d'eau interstitielle pour empêcher ou contrôler l'accumulation de pression d'eau dans les pores,
- Enlever l'excès d'eau interstitielle le plus rapidement possible pour accélérer la consolidation et favoriser un gain de force rapide structure dont l'objectif est de supprimer l'excès d'eau,
- Minimiser le débit de fuite sur l'ouvrage,
- Intercepter les eaux d'infiltration et les évacuer à l'aval du barrage,

- Abaisser la ligne de saturation et éviter les résurgences sur le talus aval,
- Activer la consolidation du remblai.

III.4. Disposition des drains et des filtres

En pratique, on place toujours un filtre entre le noyau et le drain aval, et parfois aussi entre les drains et les recharges adjacentes. Des filtres sont également à prévoir au contact entre le remblai et la fondation, lorsque la granulométrie de celle-ci apparaît critique vis-à-vis des règles du filtre. On peut enfin en placer le long de la face amont du noyau, pour éviter la migration de fines vers l'amont à l'occasion des baisses du plan d'eau.

III.5. Différents types de drainages et leur dimensionnement

Il existe plusieurs types de drainages qui diffèrent par leur formes constructives, leur emplacement dans le barrage et le rôle pour lequel ils ont été prévus.

III.5.1. Drain horizontal (tapis interne)

Définition

Un drain tapis est posé au contact fondation-remblai dans la partie aval du barrage. Il est destiné à rabattre la ligne phréatique à l'intérieur du massif et réduire les pressions interstitielles dans le talus aval.

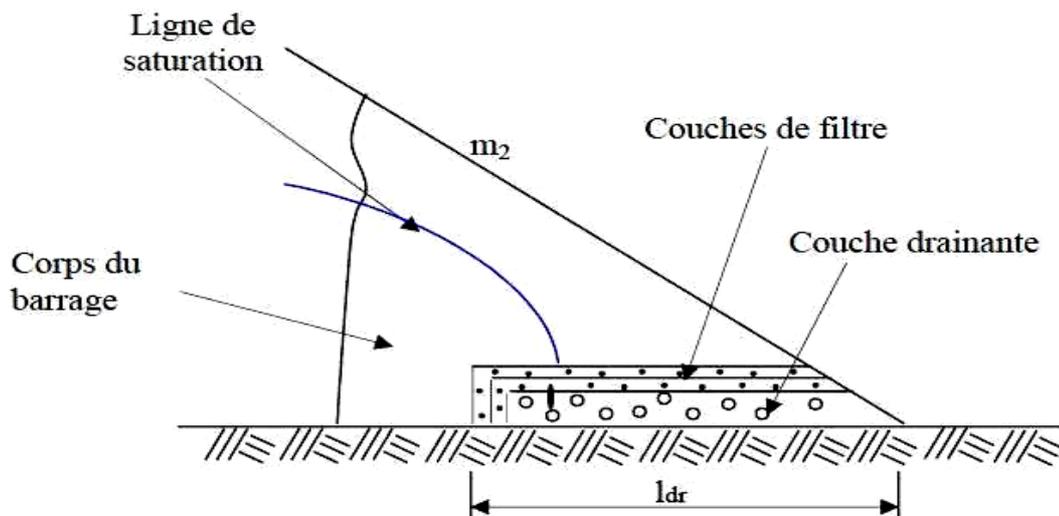


Figure III.3 : Drain tapis interne (Messaid, 2009).

Lorsque la fondation n'est pas complètement imperméable, ce drain interceptera également les infiltrations à travers la fondation. Il doit être protégé contre l'entraînement des éléments fins de

la fondation par un filtre inversé (Rolley et al, 1994).

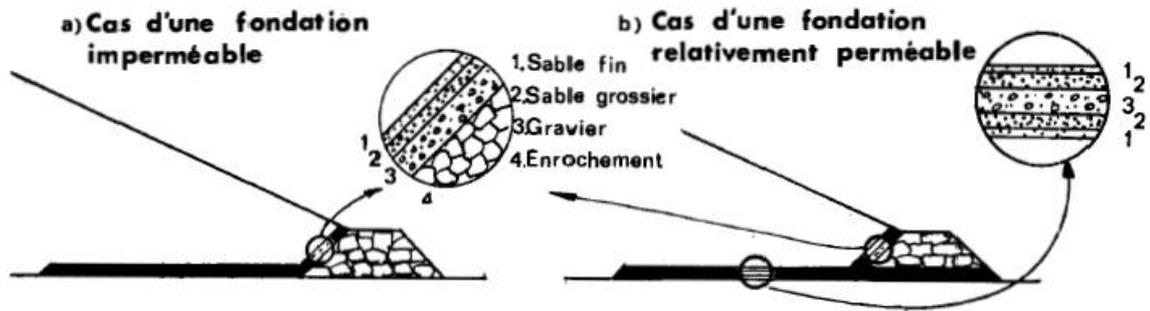


Figure III.4 : Drain tapis filtrant (Rolley et al, 1994).

Le drain tapis filtrant est efficace dans le cas où la perméabilité de massif est isotrope mais souvent il existe une anisotropie assez forte du barrage créée par la technique de compactage de la terre par couches horizontales de ce fait plus que le rapport k_h/k_v est grand le tapis drainant devient moins efficace et il y a présence des affleurements de nappes sur le talus aval des barrages munis de drain-tapis.

Un fossé (ou une tranchée drainante) de pied complète le dispositif en assurant la collecte et la canalisation des eaux interceptées (Meriaux et al, 1999).

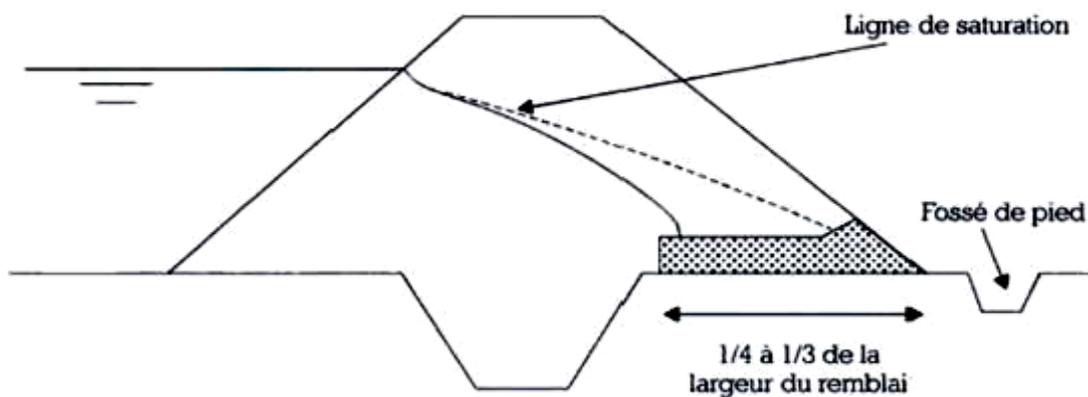


Figure III.5 : Tapis drainant aval-rabatement de la ligne de saturation (Meriaux et al, 1999).

Dimensionnement

L'épaisseur du drain tapis interne est choisie pour pouvoir évacuer le débit d'infiltration à travers le massif et sa fondation sans débordement avec un minimum de 50 cm et souvent plus.

le drain s'étend sur une longueur de 1/4 à 1/3 de l'emprise du barrage.

III.5.2. Drain vertical (drain cheminée)

Définition

Lorsqu'il ya un grand risque d'anisotropie, un drain vertical est placé de la base du remblai homogène jusqu' à le niveau normal des eaux plus 0,20 à 0,30 mètre pour éviter tout risque de contournement, près du parement aval afin de bénéficier au maximum de l'effet d'étanchéité apporté par le remblai amont. Il est réalisé en recreusant à la pelle le remblai toutes les 5 ou 6 couches compactées et déversant le sable avec soin. Il est constitué d'un matériau grossier dont la granularité est choisie de manière à ce que les conditions du filtre soient vérifiées.

L'eau de percolation interceptée par ce drain filtrant est évacuée soit par un réseau de tuyaux-drains soit par drain-tapis, s'il est également nécessaire de drainer les fondations.

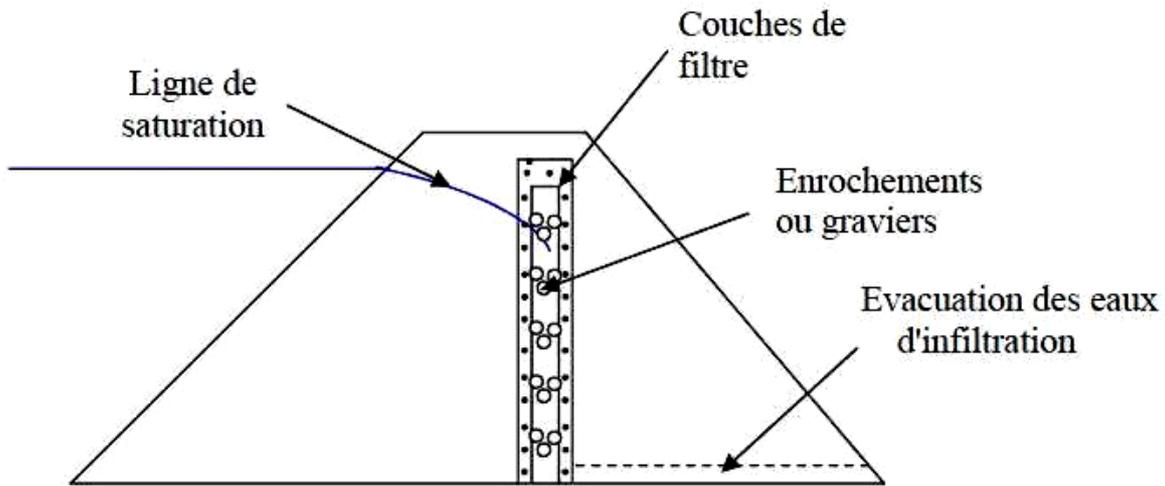


Figure III.6 : Drain vertical (Messaid, 2009).

Si le remblai n'est pas constitué de matériaux très étanches le drain vertical est raccordé au pied aval par des cordons drainants (Degoutte, 2002).

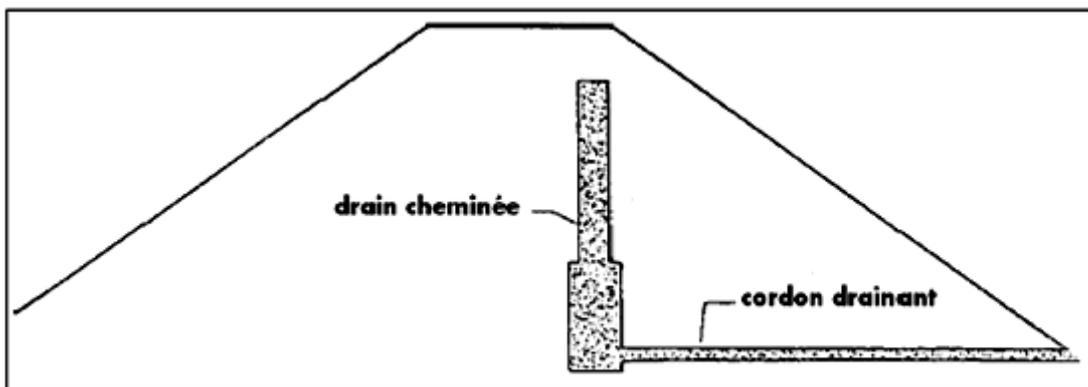


Figure III.7 : Dispositif drainant d'un remblai argileux homogène (Degoutte, 2002).

La pose, en fond du drain cheminée, d'un collecteur drainant facilite l'écoulement des eaux. Les exutoires peuvent être constitués de collecteurs PVC étanches débouchant dans le fossé de pied et espacés tous les 30 à 50 m dans le sens de la longueur du remblai (Meriaux et al, 1999).

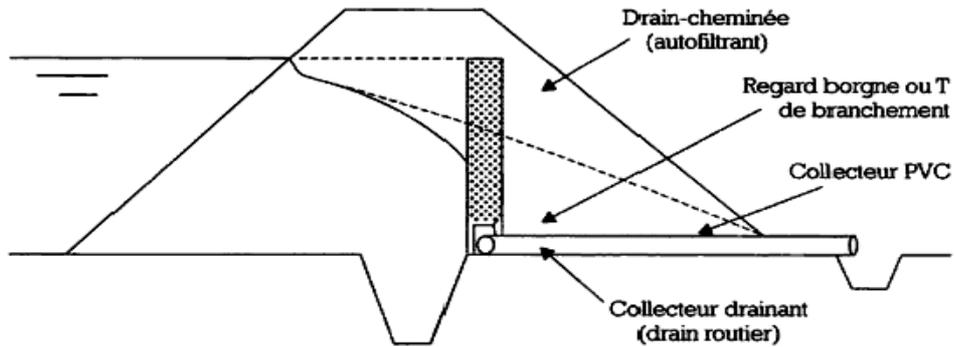


Figure III.8 : Drain vertical (Meriaux et al, 1999).

Le coût du drain cheminée demeure du même ordre de grandeur que celui d'un tapis drainant. Aussi, on préfère le drain vertical pour les remblais avoisinant ou dépassant les 8 à 10 mètres de hauteur-limite à partir de laquelle les problèmes d'anisotropie de perméabilité sont susceptibles de devenir préjudiciables au fonctionnement hydraulique de l'ouvrage (Meriaux et al, 1999).



Figure III.9 : Drain vertical creusé dans le remblai et remplissage par du sable drainant et autofiltrant

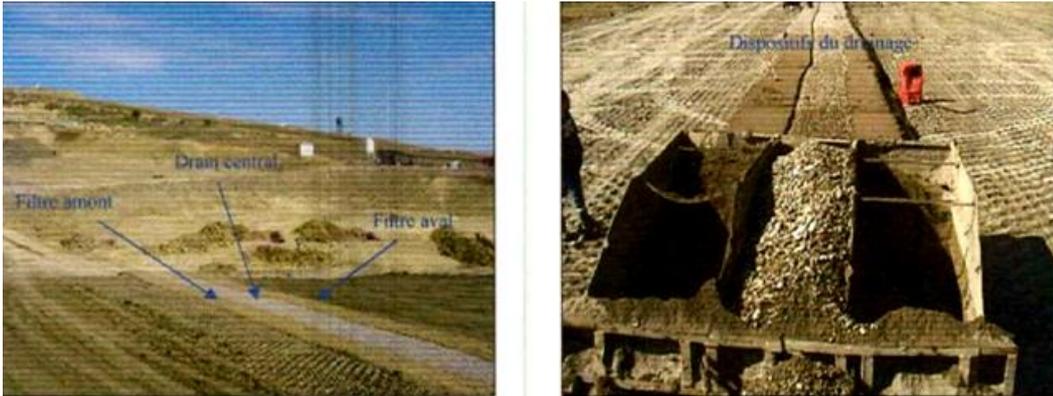


Figure III.10 :Dispositifs des filtres et du drain verticaux

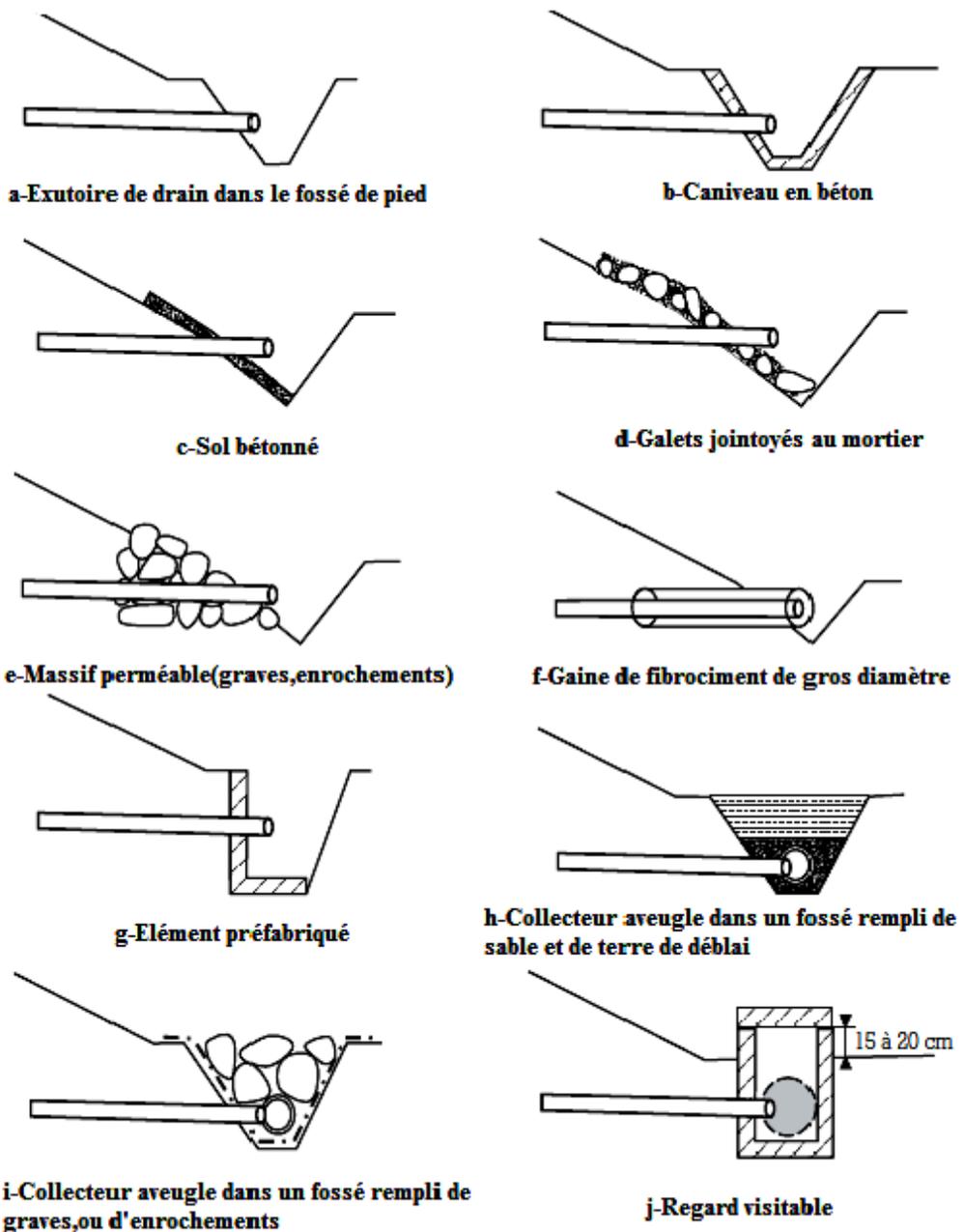


Figure III.11 : Différents types de drains en cheminée (Lautrin, 2002).

a) Hauteur du drain en cheminée

Le drain en cheminée a une hauteur variable. L'option du rabattement de la nappe par un drain mis en place jusqu'à la cote de retenue normale RN (ou la cote des plus hautes eaux) est la solution généralement privilégiée. C'est aussi la plus sûre dans la mesure où le drain intercepte ainsi toutes les percolations venues de l'amont. Le choix de cette mesure dépend de l'aspect économique (Lautrin, 2002).

III.5.3. Prisme de drainage

Définition

Il est prévu lorsqu'il y a une présence d'eau à l'aval du barrage avec une variation du niveau, mais il nécessite pour sa construction un volume d'enrochement important ce qui rend son choix fonction de la disponibilité à proximité du site de l'ouvrage de zones d'emprunts où les enrochements sont disponibles en quantité suffisante et de qualité acceptable.

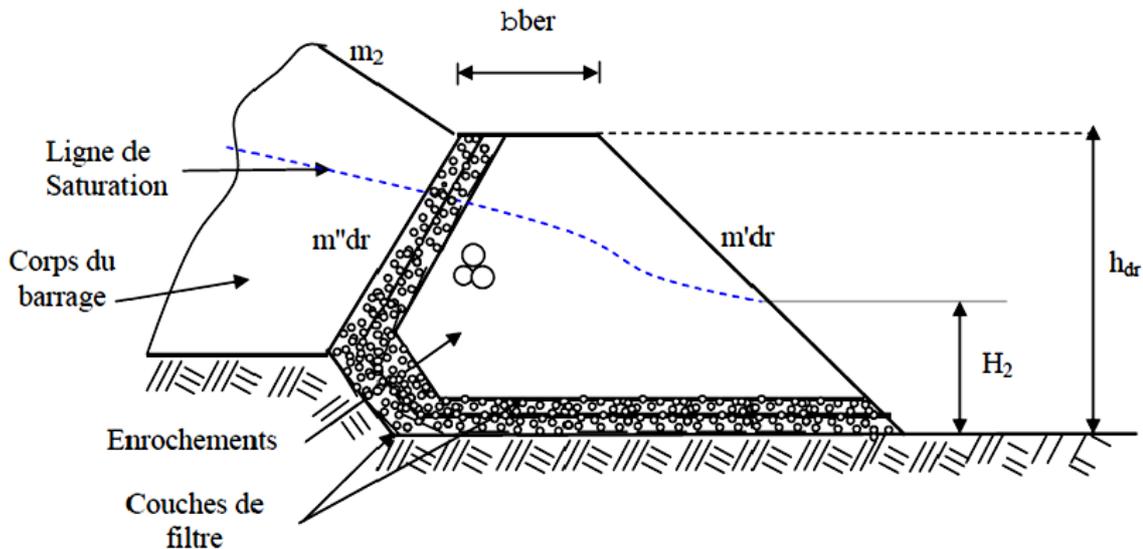


Figure III.12 : Prisme de drainage (Messaid, 2009).

Avec :

b_{ber} : Largeur de la berme.

h_{dr} : Hauteur du prisme de drainage.

m'_{dr} et m''_{dr} : Pentes de l'aval et de l'amont du prisme de drainage.

m_2 : Pente de l'aval du barrage.

H_2 :Hauteur d'eau à l'aval du barrage.

Dimensionnement

- La largeur de la berme (b_{ber}) est généralement fixée en fonction des engins utilisés pour sa réalisation, $b_{ber} \geq 3.00$ mètres

Pour les petits barrages cette largeur peut être plus petite pour des raisons économiques:

$$b_{ber} = 0.50 \text{ à } 2.00 \text{ mètres}$$

-

La hauteur du prisme de drainage (h_{dr}) est fixée si le niveau d'eau à l'aval est connu avec précision, $H_{dr} = H_2 + (0.50 \text{ à } 1.00 \text{ mètre})$

Dans le cas où la présence de l'eau à l'aval est peu probable, nous pouvons fixer la hauteur du prisme de drainage selon l'expression suivante:

$$h_{dr} = (0.15 \text{ à } 0.18) \cdot H$$

Avec: H : Hauteur totale du barrage

La pente aval du prisme de drainage est fonction des caractéristiques des enrochements et donc de leur stabilité au glissement et aux effets des vagues. Elle est généralement fixée comme suite:

$$m'_{dr} = (1.00 \text{ à } 1.50) \cdot m_2$$

m_2 : Pente amont du barrage.

La pente du talus amont est étroitement liée à la ligne de saturation et donc à la stabilité du remblai, mais elle joue aussi un rôle très important dans la quantification du débit d'infiltration. Habituellement elle est fixée comme suite:

$$m''_{dr} = (1.25 \text{ à } 2.00) \cdot m_2$$

m_2 : Pente amont du barrage.

III.5.4. Drainage de surface

Définition

Ce type de drainage, est employé dans la construction de petites retenues collinaires. Il présente l'avantage de ne pas exiger de grandes quantités d'enrochement pour sa construction et d'être facilement réparable en cas d'avaries. Il présente l'inconvénient de ne pas influencer la ligne de saturation qui peut débaucher sur le talus aval du barrage.

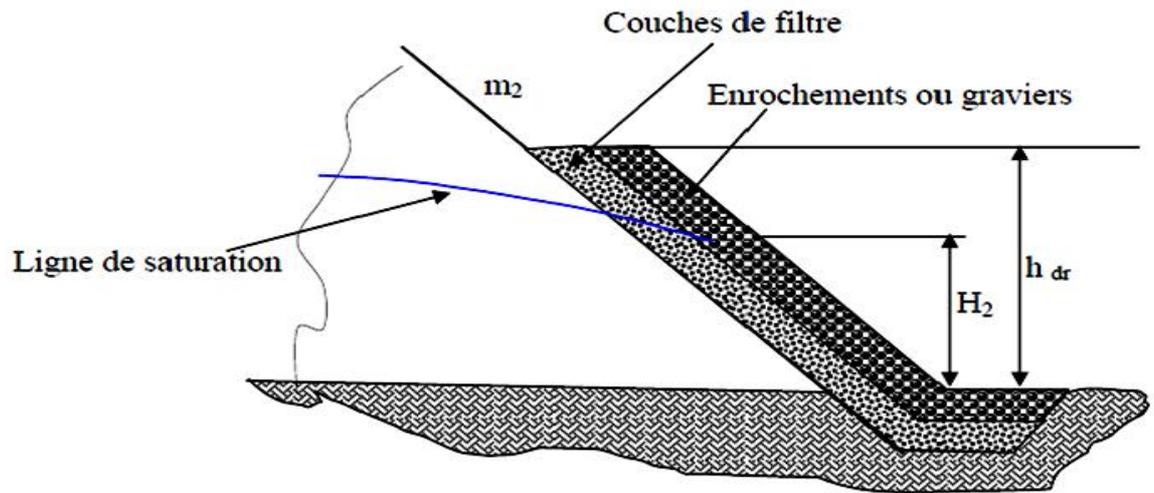


Figure III.13 : Drainage de surface (Messaid, 2002).

Avec:

m_2 : pente du Talus aval du barrage.

H_2 : Hauteur d'eau à l'aval du barrage.

H_{dr} : hauteur du drain de Surface.

Dimensionnement

- L'épaisseur du drain de surface est dimensionnée pour évacuer le débit d'infiltrations sans débordement et il doit être vérifié pour ne pas être altéré par l'action des vagues.

III.5.5. Prisme de drainage avec drainage de surface

Définition

C'est une variante qui associe les deux variantes précédentes. Il est employé dans les cas où l'étude hydrologique fait ressortir la possibilité d'une élévation exceptionnelle du niveau d'eau à l'aval et qui risquerait de dépasser la crête du prisme de drainage.

Dimensionnement

La partie constituée par le prisme est dimensionnée de la même façon que pour le prisme seul. De même pour la partie, drainage de surface mais en prenant en considération la hauteur maximale du niveau aval.

$$H_{dr} = H_{2max} + (0.50 \text{ à } 1.00 \text{ mètre})$$

Avec :

H_{2max} : Hauteur d'eau à l'aval exceptionnelle

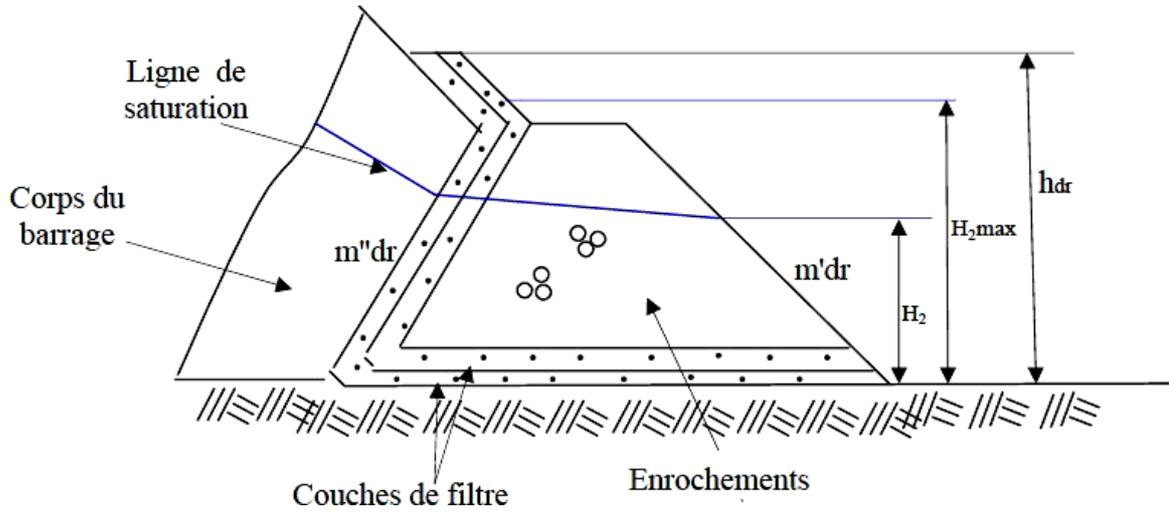


Figure III.14 :Prisme de drainage avec drainage de surface (Messaid, 2002).

III.5.6. Prisme de drainage avec drain tapis interne

Définition

Le plus souvent et pour des raisons de sécurité de l'ouvrage, on associe les deux variantes du prisme de drainage et du tapis interne. Ainsi le prisme de drainage est prolongé à l'intérieur du massif par un drain tapis interne. On rencontre deux variantes suivant que les fondations sont perméables ou non.

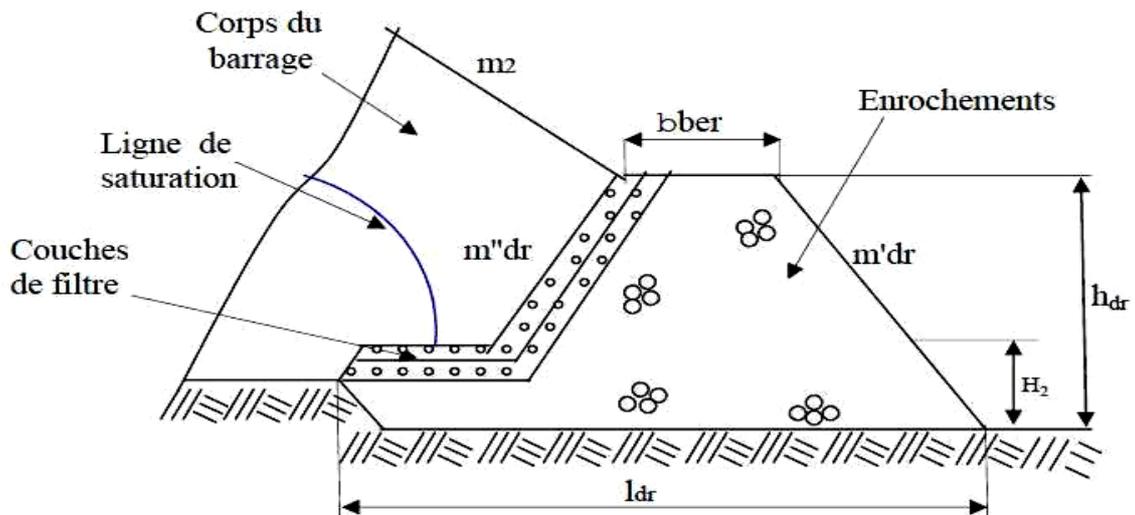


Figure III.15 :Prisme de drainage avec drain tapis interne sur fondations imperméables (Messaid, 2002).

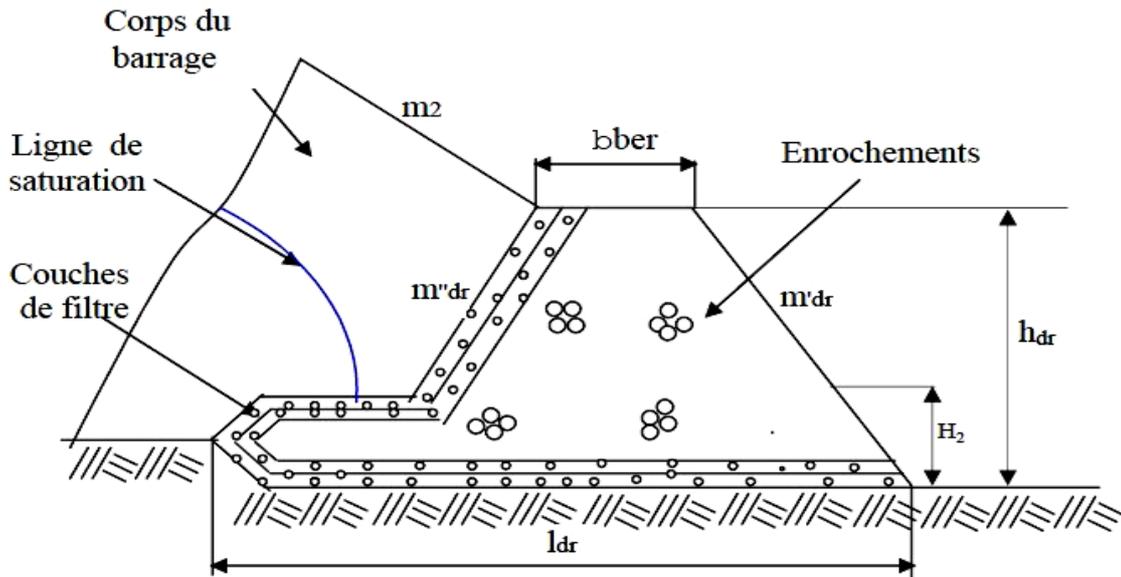


Figure III.16 : Prisme de drainage avec drain tapis internes sur fondations perméables (Messaid, 2002).

Dimensionnement

Le dimensionnement d'un tel drainage se fait de la même manière que pour le prisme et drain tapis interne sé parément.

III.5.7. Drainage à bande

Définition

C'est une variante du drain tapis interne mais la bande drainante n'est pas continue sur sa partie aval. Celle-ci est remplacée par des bandes discontinues. Ce type de drainage est prévu quand la quantité des enrochements et graviers n'est pas suffisante et que la fondation est imperméable. La bande drainante peut être remplacée par des drains tuyaux.

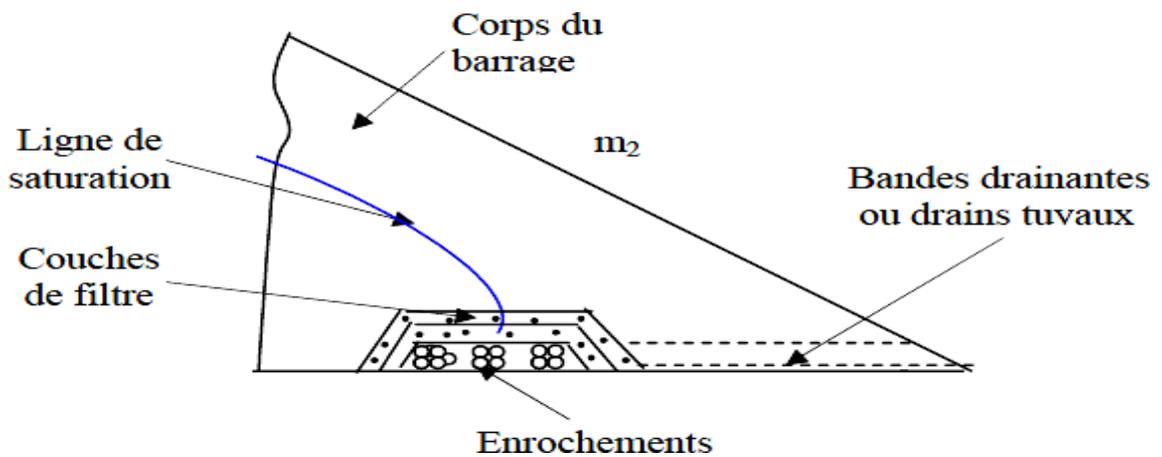


Figure III.17 : Drainage à bande (Messaid, 2002).

Dimensionnement

Le dimensionnement de ce type de drainage se fait de la même façon que pour un drain tapis interne.

III.5.8. Puits filtrants de décompression

Définition

Des puits filtrants de décompression peuvent être nécessaires pour assurer le drainage des fondations et éliminer les sous pressions dans la zone du talus aval du barrage, lorsque les fondations sont relativement perméables mais hétérogènes. Ce cas est fréquent, les dépôts alluvionnaires étant souvent formés de lentilles ou de couches alternées d'argile, de limons, de sables, de graviers.

Ces puits sont généralement équipés de piézomètres pour contrôler le niveau d'eau.

Dimensionnement

- Leurs diamètres sont d'au moins 15 cm et ils sont remblayés de matériaux drainant comme pour les drains verticaux,
- La distance entre deux puits est de l'ordre de 2,0 mètres,
- La profondeur de chaque puit est égale à 1,5 fois la profondeur de la couche perméable.

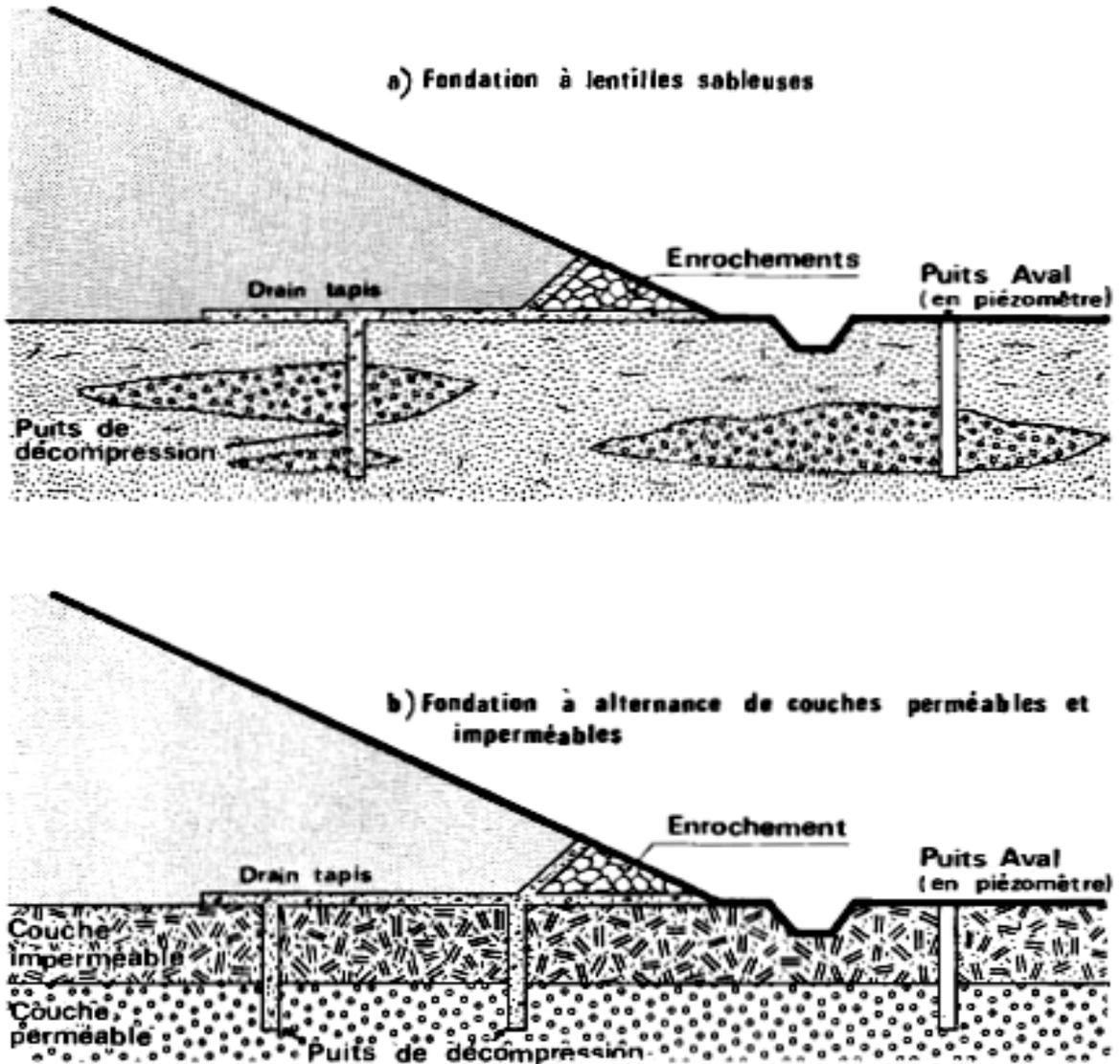


Figure III.18 : Puits filtrants (Rolley et al., 1994).

III.5.9. Utilisation des géotextiles comme filtre ou drain dans un barrage en terre

Les géotextiles sont des nappes de fibres souples, résistantes et perméables.

Dans un barrage, les géotextiles sont le plus souvent utilisés pour participer à l'évacuation des eaux de percolation en intervenant comme filtre de protection d'un matériau granulaire drainant (Degoutte, 2002).

Les fonctions principales des géotextiles sont :

- La filtration,
- Le drainage,
- Le renforcement,
- Le support anti-poinçonnement.

Le géotextile peut être un organe critique pour la sécurité dont le niveau d'exigence doit être élevé. Si pour satisfaire le rôle de filtre (drain), il est évident que le géotextile doit avoir les qualités de filtration (drainage) et être doté de certaines propriétés pour résister aux contraintes qui sont propres à son voisinage, c'est-à-dire au contact avec les autres parties du barrage, ou à l'environnement du barrage, ou plus généralement aux sollicitations exercées par le milieu extérieur sur le barrage (Femmam, 2001).

Toutefois, la mise en place d'un géotextile pour protéger un drain cheminé n'est pas aisée. Dans ce cas, une solution alternative consiste à construire le remblai en deux étapes, afin de mettre en place le géotextile entourant le drain sur un parement incliné stable à court terme (Degoutte, 2002).

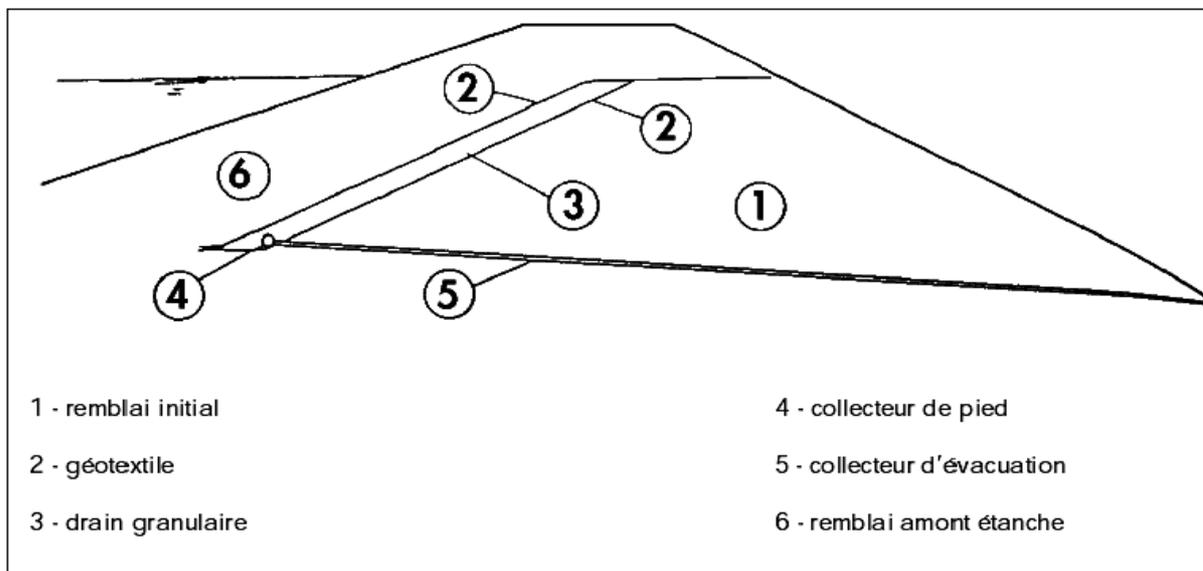


Figure III.19 : Drain granulaire incliné entouré par un géotextile (Degoutte, 2002).

Il existe des drains en géotextile composite constitués d'une nappe drainante prise en sandwich entre deux nappes filtrantes et capables d'évacuer des débits importants. Ces dispositifs peuvent remplacer le drain cheminé d'un petit barrage à condition qu'ils puissent évacuer un débit suffisant.

Le géocomposite est mis en place de la façon suivante (III.17):

- Le remblai est édifié en compactant alternativement des couches à l'amont puis à l'aval du système drainant,
- Lorsque la zone 1 est compactée, un premier panneau de géocomposite est installé et raccordé au collecteur de pied, la largeur excédentaire étant battue vers l'amont,
- La zone 2 est compactée, puis le géocomposite libre est battu vers l'aval,
- La zone 3 est compactée et ainsi de suite.

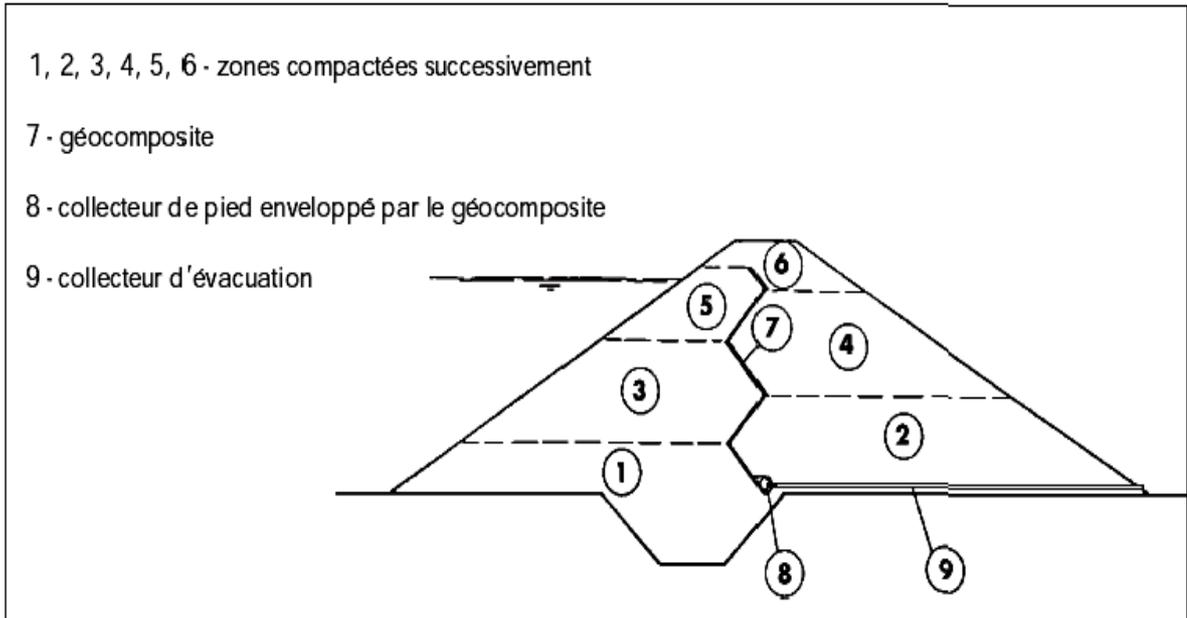


Figure III.20 : Drainage vertical assuré par un géotextile composite (Degoutte, 2002).

III.6. Différences entre les filtres de géotextiles et les filtres granulaires

Les filtres granulaires sont normalement employés dans les barrages en remblai et

l'expérience acquise à leur sujet est considérable. Les filtres de géotextiles peuvent remplir le même rôle mais certaines différences dans leur nature et leur action apparaissent lorsqu'on examine la substitution d'un filtre granulaire par un géotextile. Les différences caractéristiques sont les suivantes :

a. Uniformité

Les géotextiles sont sujets à des tolérances de fabrication mais celles-ci sont obtenues dans des conditions d'usine. Les filtres granulaires, non traités, sont sujets à la variabilité inévitable des sols naturels. Ils sont également sujets à la variabilité due à la ségrégation pendant la mise en place.

b. Maintien de la continuité

On doit compter sur l'extensibilité et la résistance d'un géotextile pour maintenir sa continuité pendant la mise en place et les déformations ultérieures. Un filtre granulaire non cohésif ne peut contenir une fissure ouverte lorsqu'il est saturé. Il maintient ainsi sa continuité par effondrement interne.

c. Épaisseur

Un géotextile est beaucoup plus mince qu'un filtre granulaire. Les pertes de charge à travers un géotextile de perméabilité semblable à celle d'un filtre granulaire sont beaucoup plus petites. Les particules en migration peuvent être arrêtées en profondeur dans un filtre granulaire. Cependant, les filtres granulaires mis en place ont généralement plus de 100 fois l'épaisseur du géotextile équivalent, et ainsi intrinsèquement ils donnent plus de sécurité.

III.7. Transitions intermédiaires

Un filtre est souvent employé comme transition entre un sol fin et un sol grossier.

La transition agit comme filtre pour le sol fin et comme base pour le sol grossier. Lorsqu'un sol granulaire est employé comme transition, les mécanismes aux deux interfaces sont les mêmes. La migration du sol de transition dans le sol grossier, est empêchée par l'arrêt des particules à l'intérieur des pores du sol grossier, et par la formation de voûtes et par l'auto-filtration à l'interface. Ce n'est pas le cas lorsqu'un géotextile est utilisé.

Les fibres d'un géotextile sont de diamètre semblable à ses pores. Le déplacement des fibres du géotextile dans le sol grossier est empêché par la tension des fibres au-dessus des pores du sol grossier, plutôt que par leurs dimensions. L'utilisation du géotextile permet un meilleur règlement de la distribution des pores, sans affecter la stabilité du filtre (CIGB, 1986).

III.8. Drainage de la fondation

En ce qui concerne le drainage des écoulements provenant de la fondation, la solution la plus satisfaisante consiste à mettre en place un tapis drainant à la base de la recharge aval, au contact remblai - fondation, jusqu'au drain vertical ou incliné situé dans la zone centrale du remblai.

Ce tapis, qui peut être compartimenté afin de connaître le comportement de chaque zone délimitée, est à mettre en place lorsqu'il s'agit d'un ouvrage important ($H^2 V > 700$). Pour les barrages plus modestes ($H^2 V < 700$), et si les conditions géologiques le permettent, ce tapis drainant peut être réduit en étant mis en place en bandes drainantes (notamment sur les zones jugées les plus sensibles des versants). Il ne peut être complètement supprimé que pour les très petits ouvrages dont $H^2 V < 100$ à condition que la fondation soit suffisamment étanche. L'épaisseur des couches doit permettre d'évacuer le débit prévu, l'épaisseur minimale de chaque

couche granulaire horizontale étant de 0,20 mètre (drain et filtre).

S'il y a en fondation une couche superficielle peu perméable, qui recouvre une couche qui l'est beaucoup plus et dont la face supérieure est située à une profondeur inférieure à $H/3$, il est préconisé d'exécuter des puits de décompression¹ (équipés en général de piézomètres) au pied aval du barrage, à raison d'un tous les 10 à 25 mètres. Le puits de décompression doit être protégé par un matériau filtrant vis-à-vis du matériau peu perméable environnant.

III.9. Conclusion

Les drains et les filtres sont des organes qui assurent la stabilité des barrages, en terre, ainsi que sa fondation. Le choix de leur emplacement et de leur dimensionnement sont à l'origine de leur utilité et efficacité. Ces choix conceptuels doivent tenir compte des aspects techniques de sécurité et des aspects économiques pour la rationalisation des coûts correspondants.

Chapitre IV

Dispositifs de protection contre les effets de l'eau cas du barrage Dahmouni

Chapitre IV Dispositifs de protection contre les effets de l'eau cas du barrage Dahmouni

VI.1. Localisation

Le barrage de Dahmouni se situe sur l'Oued Nahr Ouassel affluent de l'Oued Cheliff à environ 8 km au Nord Est de la ville de Dahmouni et 20 km à l'Est de Tiaret aux coordonnées U.T.M suivantes :

X = 369740.626 m.

Y = 3920467.723 m.

Z = 945.271 m.

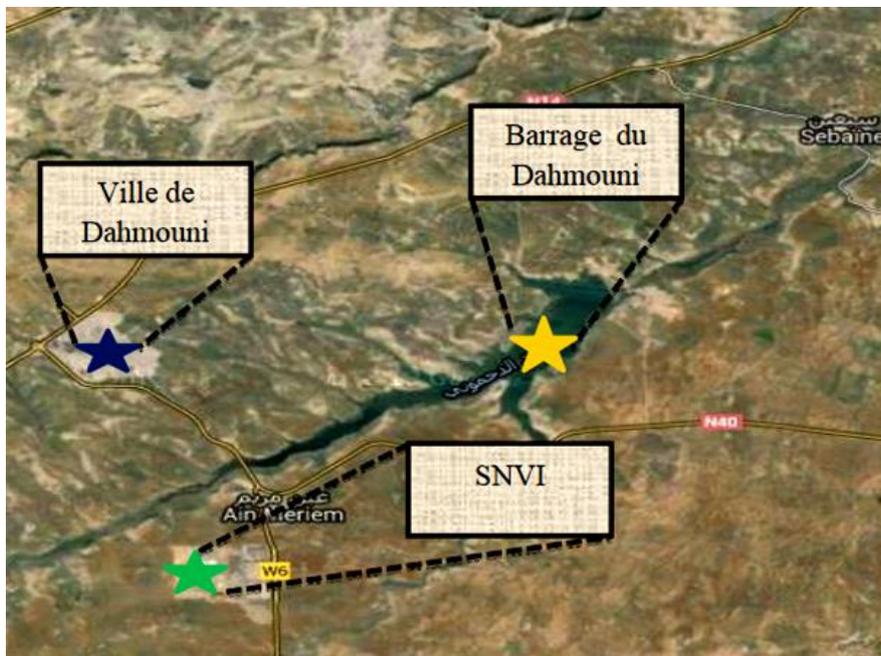


Figure VI.1 : Localisation du barrage de DAHMOUNI (google imagerie)

VI.2. Caractéristiques hydrologiques

Surface du bassin versant :	425 km ²
Précipitation moyenne (1986/2006) :	305.9 mm
Apport annuel maximum :	52 Hm ³
Apport liquide annuel moyen théorique (1913/1968) :	23 Hm ³
Apport solide annuel moyen :	0.1 Hm ³
Volume régularisé :	11.6 Hm ³

VI.3.Caractéristiques de la retenue

Niveau de couronnement (NC).....	931 [m]
Plus hautes eaux (PHE).....	928, 80 [m]
Niveau de retenue normale (NRN).....	925 [m]
Surface inondée au N R.....	1.57 [km ²]
Niveau minimale d'exploitation(Nme).....	912,40 [m]
Volume total de la retenue.....	40,58 [Hm ³]
Volume utile de la retenue	36,44 [Hm ³]
Volume mort.....	4,14[Hm ³]

Nombre d'habitants à Dahmouni	24 983 habitants
Densité de population à Dahmouni	152,1 /km ²
Coordonnées géographiques de Dahmouni	Latitude: 35.4167 , Longitude: 1.47629 35° 25' 0" Nord, 1° 28' 35" Est
Superficie de Dahmouni	16 425 hectares 164,25 km ²
Altitude de Dahmouni	Minimale 995 m, Maximale 995 m,
Climat de Dahmouni	Climat méditerranéen avec été chaud



Figure VI.2 : Barrage de DAHMOUNI

VI.4. Caracteristiques techniques du barrage de DAHMOUNI

Localisation : barrage de dahmouni

Wilaya de tiaret:

Coordonnées:

x = 297,200

y = 237,000

z = 925,00

OUED: MINA

Tableau IV.1 : Caracteristiques techniques du barrage de DAHMOUNI

<u>BASSIN VERSANT:</u>	
Surface de drainage	425 km ²
Précipitation moyenne annuelle	41522 mm
Evaporation moyenne annuelle	70 mm
Apport moyen annuel	11,4 hm ³ /an
Type	en terre
Cote de la crete	929,5 NGA
Longueur en crete	850 m
Largeur en crete	6,50 m
Hauteur maximale hors fondation	8,5 m
débit spécifique	0,85 hm ³ / s/ km ²
<u>BARRAGE:</u>	
Pentes des talus aval	1/2,2 m
Pentes des talus amont	1/3 m
<u>VOLUME DES TRAVAUX:</u>	
Recharges	871,000 m ³
Noyau	
Filter	27,600 m ³
Rip rap	80,870 m ³
Injection	5496,5 m ³
<u>RETENUE:</u>	
Cote des plus hautes eaux	927,8 NGA
Cote de retenue normale	924 NGA
Cote minimale d'exploitation	
Surface de la retenue à la cote normale	5,35 km ²
Volume de la retenue à la cote normale	42 hm ³
Volume utile	35,3 hm ³
Volume regularisé	13 hm ³
Volume mort	4,8 hm ³
<u>OUVRAGE D'EVACUATION:</u>	
Type	DEVERSOIR LATERAL
Volume de béton	10,800 m ³
Débit	515 m ³ /s
<u>VIDANGE DE FOND:</u>	
Type	VANNE
Debit	20 m ³ /s
<u>PRISE D'EAU:</u>	
Type	TOUR DE PRISE
Nombre de prises	2
Niveau des prises	912,4 et 917,4

VI.5. Choix du drain

Le drainage est utilisé pour:

- Rabaïsser la courbe phréatique et aussi garantir la stabilité au talus aval du barrage.
- Protéger le talus aval contre le phénomène renard

Étant donné que notre barrage assure une petite chute donc on a opté pour un tapis drainant entre le massif et la fondation du barrage qui constitue une solution efficace. Il sera constitué d'une couche de sable grossier succédé par une couche de gravier d'épaisseur 20,0 cm chacune.

VI.5.1. Dimensionnement du tapis drainant

La longueur de ce tapis drainant sera égale à:

$$L_d = \left(\frac{1}{3} : \frac{1}{4}\right) \cdot L_B$$

Avec :

L_d : longueur du tapis de drainage.

L_B : largeur en base du barrage.

• Calcul de la largeur en base

$$L_B = b_1 + b_2 + 6,50 \text{ m}$$

$$b_2 = m \cdot H \quad \text{CCB} = 2,2. 17,8 \text{ m} \rightarrow b_2 = 39,16 \text{ m}$$

$$b_1 = n \cdot H \quad \text{CCB} = 3,0. 17,8 \text{ m} \rightarrow b_1 = 53,4 \text{ m}$$

$$\text{D'où } L_B = 53,4 + 39,16 + 6,50 = 99,06 \text{ m} \rightarrow L_B = 100 \text{ m}$$

$$\text{Donc : } L_d = \left(\frac{1}{3} : \frac{1}{4}\right) \cdot L_B = \left(\frac{1}{3} : \frac{1}{4}\right) \cdot 100$$

$$\text{Donc : } L_d = (33,33 : 25) \text{ m} \rightarrow L_d = 30 \text{ m}$$

VI.5.2. Choix du filtre

L'augmentation des vitesses et des gradients de filtration lors de la réalisation d'un drainage accentue le danger de Renard dans le sol de fondation. Pour arrêter ce danger il y a lieu de prévoir des filtres inversés qui s'avèrent être un procédé efficace dans ce domaine. Si un bon choix de matériaux constituant le filtre inversé est fait et si les matériaux sont disposés comme suit, le filtre inversé peut éviter un développement de renard même pour un gradient de filtration $J = 7 : 20$

Pour être efficace, les filtres doivent respecter les conditions suivantes:

- 1) Les particules de la 1ère couche ne doivent pas pouvoir pénétrer dans la couche suivante: il ne faut pas qu'il y ait "versement" des fines particules dans les couches plus fines.
- 2) Il ne faut pas qu'il y ait mouvement des particules dans une seule et même couche.
- 3) Les particules du sol protégé par le filtre ne doivent pas être entraînées à travers le filtre, exception faite des particules les plus fines ce qui est considéré comme admissible.
- 4) Les filtres doivent être disposés de telle sorte que lors de leur exploitation ils ne doivent pas être bouchés par de la vase.

VI.6. Protection de la digue

VI.6.1. Protection des talus

Les talus doivent être protégés contre les dangers naturels : l'érosion provoquée par le battillage des vagues, le ruissellement des eaux de pluie, l'action des vents.

Cette protection prémunit également des dangers externes : les animaux creuseurs de terriers dans le corps de la digue, le piétinement des troupeaux domestiques, et les agissements de l'homme.

a) **Talus aval** : Pour les barrages en sol homogène la solution la plus répandue et la plus économique consiste à réaliser un enherbement sur une couche de terre végétale d'une épaisseur de 40 cm, ou bien une couche d'enrochement d'épaisseur de 40cm pour plus de sécurité.

b) **Talus amont** : Il est protégé contre les effets des vidanges rapides, le battillage des vagues et les averses violentes.

On opte pour une protection en enrochement, cette protection consiste à la réalisation de couches d'épaisseurs prédéterminées de blocs de pierre de dimensions appropriées(rip-rap).

Le matériau devra être sain, d'un poids capable de résister à la poussée des vagues.

Les dimensions de l'enrochement peuvent être déterminées théoriquement en fonction de la hauteur des vagues et de leurs vitesses de propagation par les méthodes suivantes :

VI.6.2. Détermination de l'épaisseur minimale de la couche d'enrochement

Pour déterminer l'épaisseur de cette couche, on utilise plusieurs méthodes.

La méthode de « U.S.ARMAY », Les ingénieurs de l'USARMY utilisent de préférence le tableau donnant l'épaisseur minimum de la couche d'enrochement ainsi que les dimensions minimales des blocs en fonction de la hauteur des vagues.

Les valeurs de l'épaisseur minimum de la couche d'enrochement et D_{50min} sont données par le tableau suivant :

Tableau VI.2: Epaisseur mini de la couche d'enrochement en fonction de la hauteur des vagues

Hauteur des vagues (m)	Épaisseur minimum de la couche d'enrochement (m)	$D_{50minimum}(m)$
0 à 30	0,30	0,20
0,30 à 0,60	0,40	0,25
0,60 à 1,20	0,45	0,30
1,20 à 1,80	0,55	0,40
1,80 à 2,40	0,70	0,45
2,40 à 3,00	0,80	0,55

Pour notre cas $H_v = 0,80m$, donc $0.6 < H_v < 1.2$ m, on trouve que l'épaisseur min de la couche d'enrochement égale à 0,45m, et le D_{50min} égale à 0,3m.

D'où : $e = 0,45m$; $D_{min} = 0,3m$.

Conclusion : En analysant les résultats obtenus, on adopte pour la suite du dimensionnement de la digue une épaisseur de couche $e = 45$ cm et un diamètre moyen de 30cm. Donc une protection du talus amont d'une épaisseur de 45 cm d'enrochement avec 30 cm de filtre (lit de gravier et sable).

VI.6.3. Protection de la crête

La crête de la digue sera revêtue d'une couche de produit asphaltique de 40 cm d'épaisseur, afin d'éviter les fissures dues au retrait des matériaux argileux et de permettre en plus le passage d'un véhicule.

VI.6.4. Étanchéité de la fondation

Une clé d'étanchéité est prévue dans la continuité de la digue en argile afin d'assurer une bonne liaison entre la fondation et le corps de la digue. Elle doit être réalisée lorsque la fondation imperméable n'est pas atteinte après décapage. Pour la variante choisie une clé d'étanchéité est prévue dans la continuité de l'argile.

Elle permettra en plus de l'étanchéité d'assurer l'ancrage de la digue. La clé d'étanchéité est constituée d'argiles compactées.

La hauteur de la clé d'étanchéité à partir du terrain naturel est de 2.5m La pente des talus de la clé d'étanchéité est $m=1$.

VI.7. Drainage du barrage

Pour éviter le phénomène des sous pressions et pression interstitielle dans le corps du barrage, on prévoit un dispositif de drainage qui a pour rôle d'intercepter les eaux d'infiltration, et de les faire sortir en aval du barrage sans causer de dégât préjudiciable au barrage.

Les dispositifs drainant les plus appropriés pour remplir ces fonctions sont, Un drain vertical (pour protéger au maximum le talus aval contre les pressions interstitielles et les sous- pressions) Ce drain peut être incorporé au centre de la digue homogène se compose de graviers d'une largeur égale à 1.5 m et une couche de 15 cm de sable. sa hauteur est de 12m est relié au pied du talus aval par un drain horizontal (tapis drainant) identique au drain vertical de tout point de vue, il est relié à la restitution (oued) par un drain prisme qui va participer à la stabilité de l'ouvrage.

La fonction principale des drains est la maîtrise des percolations d'eau dans le corps du barrage. Il y aura abaissement de la ligne de saturation, diminution de la pression d'écoulement et de la pression interstitielle, et accélération de la consolidation.

Le matériau utilisé pour un drain doit avoir normalement une perméabilité plus élevée que celle du sol drainé. Le gravier, de granulométrie fine à grossière est un matériau idéal, si elle est bien appropriée, la roche exploitée peut être également utilisée.

Ces matériaux sont disposés en bandes, en couches minces ou en cheminée (drain vertical).

Ils doivent être inaltérables, parfaitement propres et en conséquence soigneusement lavés si nécessaire.

Leur granulométrie est adaptée de façon à respecter les règles de non entraînement des fines particules du matériau adjacent.

VI.7.1. Dimensionnement du drain prisme

a) Dimensionnement deprisme

Hauteur: $h_p = (0.15 \div 0.2) h_b$

h_b : Hauteur du barrage ($h_b = 17,8\text{m}$)

On prend $h_p = 0.175 h_b$ Ce qui nous donne : $h_p = 3,11\text{m}$ On prend : $h_p = 3,2\text{m}$

Largeur en crête : $b_p = (1/3 \div 1/4) h_{dr}$

On prend : $b_p = 1/3 h_{dr} = 0.33 * 3 = 0.99\text{ m}$

On prend : $b_p = 1\text{ m}$

b) Dimensionnement du Drain tapis

$$L_d = 1/4 L_b$$

L_d : longueur du drain tapis en m

L_b : largeur transversale du barrage ($L_b = 100\text{ m}$)

On trouve $L_d = 25\text{ m}$.

VI.7.2. Calcul des filtres

Lorsque le matériau constructif du drain ne respecte pas les conditions de non entraînement des particules fines du massif à drainer, on interpose alors un filtre entre les deux matériaux, sa fonction principale est de retenir ces particules du sol drainé tout en permettant à l'eau du sol de s'écouler dans la zone drainante constituée de matériaux grossiers.

Ces filtres peuvent être situés :

Entre deux couches du sol adjacentes dont les granulométries sont assez différentes pour que les éléments de l'un des sols puissent migrer dans l'autre sol.

Entre un sol à granulométrie fine, qui doit être drainé, et les matériaux relativement grossiers et perméables constituant les drains.

A l'interface entre un remblai de granulométrie fine et une fondation très perméable où l'écoulement peut éroder les particules fines du remblai.

Les filtres peuvent être constitués des couches successives de matériaux perméables, de granulométries de plus en plus fines assurant la transition entre le drain et les éléments fins du milieu à drainer. De nos jours, on remplace souvent ces filtres granulaires naturels ou concassés par des géotextiles issus de l'industrie du textile et se présentent en rouleaux de longueur variable offrant ainsi l'avantage d'être économique et une facilité de mise en œuvre par rapport aux filtres à base de plusieurs couches de matériaux calibrés.

VI.7.3. Règles générales de dimensionnement des filtres

La référence usuelle en la matière est celle des règles de Terzagui. Elles s'énoncent comme suit :
Soit d_x la dimension caractéristique du matériau fin à drainer, c'est-à-dire le diamètre du tamis pour lequel on enregistre $x\%$ en poids dépassant lors du tamisage granulométrique.

Soit D_x celle relative au matériau adjacent (plus grossier) constitutif du filtre ou du drain.

Critères de conception

$$\frac{D_{15}^{filtré}}{d_{85}^{sol}} \leq 4 : 5 \text{ Condition d'entraînement des particules fines pour le phénomène de renard}$$

$$\frac{D_{15}^{filtré}}{d_{15}^{sol}} > 4 : 5 \text{ Condition de perméabilité}$$

$$\frac{D_{50}^{filtré}}{d_{50}^{sol}} < 25 \text{ Condition de parallélisme des courbes granulométriques}$$

$$\frac{D_{60}^{filtré}}{d_{10}^{filtré}} \leq 20 \text{ Condition d'uniformité du filtre}$$

En se basant sur ces règles, nous allons procéder au dimensionnement de ces différents composants du système de drainage à savoir les filtres et les drains.

Pour construire le fuseau granulométrique nous allons déterminer le D_{15} , D_{50} et D_{60} du filtre.

$$D_{15 \text{ filtre}} < 4 \cdot d_{85 \text{ sol}}$$

$$D_{15 \text{ filtre}} < 4 \cdot 0,095 ; D_{15 \text{ filtre}} < 0,38 \text{ mm}$$

$$D_{15 \text{ filtre}} > 4 \cdot d_{15 \text{ sol}}$$

$$D_{15 \text{ filtre}} > 4 \cdot 0,00043 ; D_{15 \text{ filtre}} > 0,00172 \text{ mm}$$

$$D_{50 \text{ filtre}} < 25 \cdot d_{50 \text{ sol}}$$

$$D_{50 \text{ filtre}} < 25 \cdot 0,022 ; D_{50 \text{ filtre}} < 0,55 \text{ mm}$$

$$D_{60 \text{ filtre}} < 20 \cdot d_{10 \text{ filtre}}$$

$$D_{60 \text{ filtre}} < 20 \cdot 0,0380 ; D_{60 \text{ filtre}} < 0,76 \text{ mm}$$

Avec: D_{xx} : diamètre caractéristiques des filtres.

d_{xx} : diamètre caractéristique du noyau.

- Couches horizontales de sables : **0,15 m**
- Couches horizontales de graviers : **0,30 m**
- Couches verticales ou inclinées : **1,00 m**

Notre filtre est constitué du gros sable et sable fin, donc il faut utiliser une épaisseur minimale de 0,15 m pour la couche du filtre horizontale et 1 m pour la couche du filtre vertical ou inclinées.

VI.7.4. Vérification de la condition d'absence du phénomène de renard

La condition de l'absence du phénomène de renard au massif du sol est vérifiée comme suit :

$$\frac{D_5}{D_{17}} \geq 0,32 \cdot \sqrt[6]{\eta} \cdot (1 + 0,05 \cdot \eta) \frac{\eta}{1 - \eta}$$

Avec η : Coefficient d'hétérogénéité du sol du filtre, $\eta = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 7,6$

n : Porosité du sol en fonction d'unité $n = n_0 - 0,1 \cdot \text{Log} \eta$

$n_0 = 0,4$ pour les sols caillouteux ; $n_0 = 0,45$ pour les sols argileux.

D_5 (mm)	0.06
D_{17} (mm)	0.11
n_0	0.45
n	0.36

$$\frac{D_5}{D_{17}} \geq 0,32 \cdot \sqrt[6]{\eta} \cdot (1 + 0,05 \cdot \eta) \frac{\eta}{1 - \eta} \quad \text{AN : } 0,55 > 0,34$$

Donc Il n'y a pas de risque de l'apparition du phénomène de renard dans le filtre.

VI.7.5. Vérification de la suffisance de la perméabilité du filtre

$$K_F \geq (2 + \sqrt[6]{\eta}) K_N$$

K_F : Coefficient de perméabilité du filtre.

K_N : Coefficient d'infiltrations du remblai de la digue $1,3 \cdot 10^{-8}$ m/s.

AN: $K_F \geq 4,42 \cdot 10^{-8}$ m/son prend : $K_F = 4,5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

VI.7.6. Vérification de la résistance d'infiltration du sol du barrage

La résistance d'infiltration du sol constituant la digue est donnée par :

$$I = \frac{\Delta H}{\delta n} < I_{adm}$$

ΔH : perte de charge dans le corps de la digue.

δn : épaisseur moyenne de la digue.

I_{adm} : gradient hydraulique admissible ; on le détermine à partir du tableau suivant

Tableau VI.3 : Classification des barrages

Classe de l'ouvrage	Sol de fondation	
	Rocheux	Meuble
I	$H_b > 100$ m	$H_b > 50$
II	De 50 à 100 m	De 25 à 50 m
III	De 20 à 50 m	De 15 à 25 m
IV	$H_b < 20$ m	$H_b < 15$ m

Notre barrage appartient à la **classe IV**.

Tableau VI.4 : Gradient admissible à travers le remblai terreux.

Sol du corps du barrage	Classe de l'ouvrage			
	I	II	III	IV
Argile	1,5	1,65	1,8	1,95
Limon	1,05	1,15	1,25	1,35
Sable grossier	0,7	0,8	0,9	1,0
Sable moyen	0,55	0,65	0,75	0,85
Sable fin	0,45	0,55	0,65	0,75

ΔH : la différence du niveau d'eau amont aval ($\Delta H = 11,6$ m)

$$\Delta H = 924 - 912,4 = 11,6 \text{ m}$$

$$I_{adm} = 1,95; \text{ Donc: } \Delta H = 11,6 \text{ m; } \delta n = 45 \text{ m; } I = 0,21 \leq I_{adm}$$

$$I = \frac{\Delta H}{\delta n} < I_{adm} \text{ D'où } I = \frac{11,6}{45} = 0,25 < I_{adm}$$

D'où la résistance à l'infiltration du sol du barrage est assurée.

VI.7.7. Fondation du barrage :

Cette vérification s'effectue en utilisant l'expression d'après Pdaux :

$$J_f \leq \frac{J_{cr}}{K_s}$$

J_{cr} : gradient d'infiltration critique qui est déterminé en fonction du type de sol de fondation d'après le tableau ci-dessous.

Tableau : VI.5 : Détermination du gradient d'Infiltration admissible.

Sol de fondation	J_{cr}
Argile	1,20
Limon	0,65
Sable gros	0,45
Sable moyen	0,38
Sable fin	0,29

K_s : coefficient de sécurité déterminé d'après le tableau suivant.

Tableau : VI.6 : Détermination de coefficient de sécurité

Classe du barrage	I	II	III	IV
K_s	1,25	2,00	1,15	1,10

J_f : gradient d'infiltration dans la fondation du barrage, on le détermine d'après la formule suivante

$$J_f \leq \frac{J_{cr}}{K_s} \quad J_f \leq \frac{1,2}{1,15} = 1,04$$

$$J_f = \frac{\Delta H}{L + 0,88.T_c} \quad \text{D'où} \quad J_f = \frac{11,6}{100 + 0,88.2} = 0,11$$

T_c : profondeur de calcul de la zone d'infiltration de la fondation ($T_c = 2\text{m}$) L : largeur du barrage à la base ($L = 100\text{ m}$)

ΔH : la différence du niveau d'eau amont aval ($\Delta H = 11,6\text{ m}$)

Pour notre barrage qui appartient à la III^{ème} classe avec une fondation marno argileuse « $k_s = 1,15$ et $J_{er} = 1,2$ ».

On trouve : $J_f = 0,11 < 1,04$

La condition est vérifiée, la résistance d'infiltration à travers les fondations est assurée.

VI.8. Le dispositif de drainage :

Après avoir réduit les quantités d'infiltration et les pressions interstitielles par le biais du tapis amont imperméable nous devons à présent :

- Au niveau du remblais, assurer un rabattement de la ligne phréatique, ce qui aura pour effet de réduire ou d'annuler les pressions interstitielles défavorables à la stabilité du talus aval et d'empêcher par la même occasion le suintement de l'eau sur la face aval ce qui est un facteur d'érosion.

- au niveau de la fondation, assurer une libre décharge de l'eau d'infiltration permettant d'éviter une rupture du barrage par soulèvement.

Le dispositif qui nous permet de respecter ces contraintes est constitué par d'un drain vertical et d'un tapis de drainage horizontal dont les épaisseurs et les perméabilités seront fonction du débit d'eau à évacuer. Ces drains seront combinés à des filtres dont le rôle sera d'éviter l'encrassement et d'empêcher la migration des fines particules de sol entraînées par l'eau.

Calcul des dimensions des drains :

Les calculs se feront à l'aide de la loi de Darcy

$$Q = K \cdot i \cdot A \text{ ou } Q = K \cdot i \cdot B$$

Si nous considérons une unité de longueur du barrage

Q : débit en cm³/s/m

I : gradient hydraulique

B : épaisseur du drain

Nous aurons donc une épaisseur du drain

$$B = Q / K \cdot i$$

Compte tenue de l'imprécision qui réside dans la détermination du coefficient de perméabilité

Nous allons multiplier par 10 nos débits de calcul afin de tenir compte de ce fait dans le dimensionnement des drains.

a) le drain horizontal :

Le drain horizontal doit évacuer le débit venant du barrage et celui venant de la fondation

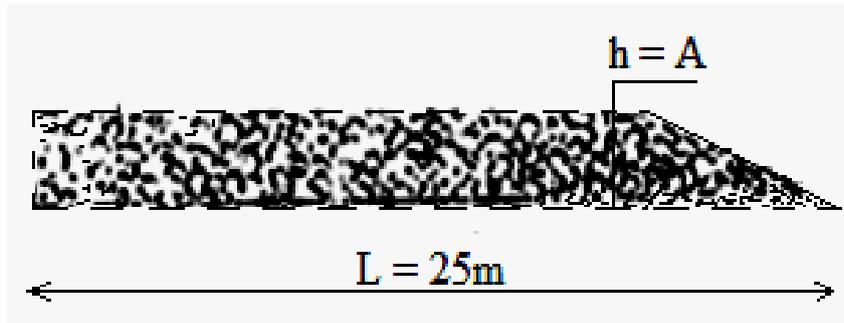
Q barrage = 0,55 x 10⁻⁴ cm³/s/cm

Q fondation = 0,825 cm³/s/cm

D'où Q à évacuer = 0,825 cm³/s/cm

Qc de calcul = Q à évacuer x 10 = 8,25 cm³/s/cm

$$A = \frac{Q_c}{K \cdot i} = \frac{Q}{K \cdot \left(\frac{h}{L}\right)}$$



$$\Rightarrow h = A \Rightarrow A = \sqrt{\frac{Q \cdot L}{K}} = \sqrt{\frac{8,25 \times 2500}{K}}$$

Avec $k = 1 \text{ cm/s}$ on trouve $h = A = 1,4 \text{ mètres}$

$k = 10 \text{ cm/s}$ on trouve $h = A = 0,45 \text{ mètres}$

$k = 40 \text{ cm/s}$ on trouve $h = A = 0,22 \text{ mètres}$

$k = 50 \text{ cm/s}$ on trouve $h = A = 0,2 \text{ mètres}$

Nous prendrons les valeurs qui nous semblent les plus raisonnables pour des épaisseurs de drain soit

$k_{\text{drain}} = 1 \text{ cm/sec}$

Épaisseur du tapis = 2 mètres

b) le drain vertical :

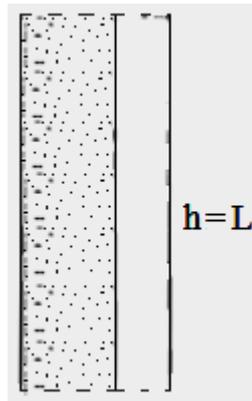
Pour ce cas nous allons prendre une épaisseur minimale de 2 mètres pour permettre aux engins de compactage de travailler sans difficulté. Le drain vertical doit évacuer le débit Q venant du barrage on devra alors considérer.

Q_c de calcul = $10 \times 0,55 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s/cm}$

D'où

$$\Rightarrow \frac{Q}{\left(\frac{h}{L}\right)A} = \frac{0,55 \times 10^{-3}}{1.200} = 0,27 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s} = k$$

Nous prendrons $h = 10^{-3} \text{ cm/s}$ pour tenir compte des exigences minimales car pour être efficace, le filtre doit être au moins 100 fois plus perméable que le corps du barrage.



Conclusion

En finalité, le travail élaboré constitue une première ébauche relative aux analyses multicritères à engager lors de la conception des systèmes de drainage des barrages en terre.

La prise en charge au niveau de cette analyse de l'ensemble des critères d'influence, notamment l'anisotropie de matériaux de remblais, est d'une nécessité absolue.

Ce critère oblige donc les concepteurs à orienter les études géotechniques relatives à la reconnaissance des matériaux en fonction de la connaissance, au préalable des perméabilités directionnelles des sols de remblais.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Quelque soit la perméabilité d'un barrage en terre, il ya toujours infiltration dans son massif.

IL n'existe pas d'étanchéité parfaite pour ce type d'ouvrage. La maitrise des écoulements doit être recherchée de telle manière que les paramètres liés aux infiltrations restent en dessous des paramètres critiques (débit, pressions interstitielles, gradients hydraulique...et).

Un bon drainage bien contrôlé est l'une des meilleures lignes de défense pour assurer la sécurité d'un ouvrage. A cet effet l'influence du dimensionnement de ce dispositif essentiel sur les caractéristiques d'écoulement est très importante.

Ce travail a été entrepris dans le but d'analyser l'importance du système de drainage dans un barrage en terre, les techniques de son dimensionnement et la recherche de son emplacement efficace dans le massif constituant le barrage.

Les choix conceptuels des systèmes de drainage pour les barrages en terre doivent tenir compte d'un certains nombre de paramètres : géométrie et dimensions, types (tapis ou cheminée), anisotropie des matériaux de remblais, position (central ou translaté à l'aval) et des critères économiques.

Les drains dans les barrages en terre ont une multitude de fonctions très variées: intercepter les eaux d'infiltration et les évacuer à l'aval du barrage, abaisser la ligne de saturation et éviter les résurgences sur le talus aval, et garder une grande partie du remblai non saturé afin de conserver les caractéristiques géotechniques du matériau utilisé, décompresser la fondation et donc minimiser les pressions interstitielles et activer en dernier la consolidation du remblai.

Si l'on plaçait les drains directement au contact des matériaux à granulométrie fine comme la terre à noyau, l'eau en écoulement entraînerait les particules fines à travers les vides intergranulaires du drain et on obtiendrait une érosion interne nommée renard ; ce phénomène est d'autant plus dangereux qu'il est accéléré : le début de l'érosion diminue la perméabilité, donc augmente la vitesse de l'eau, ce qui accroît la vitesse d'érosion.

La solution préventive consiste à disposer des «filtres» entre des matériaux dont les granulométries sont très contrastées: ce sont des matériaux de granulométrie intermédiaire, choisie de telle sorte que les grains du matériau fin amont ne puissent pénétrer les vides intergranulaires du matériau filtre.

Un filtre doit donc être dimensionné en fonction du matériau qu'il doit soutenir ; il doit pouvoir être mis en place de manière homogène, sans ségrégation.

Le comportement à long terme des filtres des barrages est mal connu faute d'observations suffisantes. Il existe des risques de contamination du filtre, donc de diminution de son épaisseur

et de sa capacité drainante, par migration sur une certaine longueur des fines du matériau argileux.

En ce qui concerne la perméabilité, il faut noter qu'elle diminue rapidement avec le pourcentage de fines. En limitant, par lavage, ce pourcentage on peut multiplier par 10 ou même 100 la perméabilité de matériaux à granulométrie continue.

Pour les fondations, On dispose des tapis drainants, tranchées drainantes ou puits filtrants, sans oublier que les galeries drainantes, notamment dans les rives rocheuses, assurent une grande sécurité pour une dépense supplémentaire relativement faible vis-à-vis du coût des organes d'étanchéité dont elles permettent en même temps un bon contrôle.

Enfin, il faut noter que, de plus en plus, les matériaux des différentes zones des barrages sont traités (criblés, lavés, mélangés), l'objectif étant de réaliser non seulement des zones de transition sur le plan de la perméabilité, mais aussi sur le plan de la déformabilité de façon à réduire les risques de fissurations horizontales ou verticales. Un drainage interne bien implanté est l'organe de sécurité fondamental du barrage en terre et de sa fondation, mais un bon projet ne suffit pas à assurer la sécurité et une mise en place correcte et bien contrôlée est capitale.

Enfin, le contrôle du comportement du drainage non seulement durant les premières mises en eau, mais tout au long de la vie du barrage, par des mesures régulières des fuites et par un réseau de piézomètres bien implantés et en nombre suffisant à l'amont comme à l'aval des organes étanches est un élément de la sécurité non moins important.

Le dispositif de drainage qui vit avec le barrage et sa fondation au rythme des remplissages et vidanges successifs peut se colmater ou se cimenter.

En perspective il est intéressant de rechercher la liaison très étroite qui existe entre les filtres et les systèmes de drainage car les deux organes constructifs jouent des rôles complémentaires dans un barrage en terre et parfois les filtres peuvent remplacer carrément les drains. L'écoulement de l'eau à l'entrée des drains nécessite aussi une exploration et une clarification.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] - Post, G., &Guerber, P. (1973). Conception du drainage dans les barrages en terre. La HouilleBlanche, (5-6), 467-476.
- [2] - Rodríguez, B. A. and S. La Rosa (2004). Manuel de conception et projets typiques des digues en terre.
- [3] - Blais J. (2005).Typologie de l'érosion interne et érosion internes des digues fluviales, 70 p, p66-67.
- [4] - Comité internationale des grands barrages.Géotextiles : filtres ettransition pour barrages enremblai, bulletin 55, 129p.
- [5] - Comité internationale des grands barrages. (1993) - Barrages en remblai : protection du talus amont, bulletin 91, 121p.
- [6] - Comité internationale des grands barrages.1995 -Barrages en remblai : filtres et drains granulaires, bulletin 95, 256p.
- [7] - Bouhlali M. (2006).Les risques associés aux barrages, mémoire de magister, université Aboubekrbalkaid Tlemcen.
- [8] - CIGB (ICOLD). (1986).Géotextiles : filtres et transitions pour les barrages en remblai.Bulletin55,129 p.
- [9] - Toumi A., Remini B. (2002).Contribution à l'étude des fuites dans les barrages Algériens,1ères journées pluridisciplinaires sur les sciences de l'ingénieur "JPSI'1 2002", UniversitéHassibaben Bouali Chlef, 15-17 Décembre.
- [10] - LAUTRIN D, (1997). Groupe européen de recherche sur l'érosion interne dans lesbarrages en remblai : 7 exemples d'incidents et d'accidents 1996-1997. Cemagref,Bordeaux. 19 p.
- [11] - BenkaciS.(2014).Chap.6–barragesenremblais.ummtto(Tizi-Ouzou),PP103.

- [12] - Cherif S., Bouhassane M. (2013). Etude comparative des barrages anoy au central. Mémoire de Master. Tlemcen : université abou bekr belkaid, faculté de technologie, pp93.
- [13] - Degoutte G. (1997). Petits barrages - recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, Cemagref Editions, Paris, 173p
- [14] - Désodt C., Horsin Molinaro H. (2016). Phénomène de boullance et d'érosion régressive (renard hydraulique) dans les barrages. 11p, 3-6P.
- [15] - MONNET A. (1998) - Boullance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement - Revue Française de géotechnique, n° 82, p.3-10.
- [16] - Alonso E. (2008). Barrages en remblais. Cemagref.
- [17] - Messaid B. (2009) Étude de la position efficace des drains dans les barrages en terre, université colonel Hadj-Lakhdar-Batna, thèse de doctorat, soutenue en 2009, Batna, Algérie. 263P.
- [18] - Rouissat N. (2007). Approche méthodologique du suivi de comportement des barrages en remblai. Mémoire de magister. Département de génie civil. Faculté de technologie université Aboubekr Balkaid, Tlemcen.
- [19] - Tacgrift H. (2008). Risque de renard hydraulique modélisation des écoulements dans le corps de digue, 21 p.
- [20] - AYADAT T, BELOUAHRI B. et AIT AMMAR R, (1998) - La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme de l'effondrement - Revue Française de géotechnique, n°83, p.73-81.
- [21] - BONELLI S. (2001) Ouvrages hydrauliques en remblai : un regard transversal sur l'action de l'eau - Revue Ingénieries n° 26-p. 49-58