Liste des abréviations

BCR : le bêton compacté au rouleau

RCC : Roller Compacted Concrete

NNR : nivaux normal de retenus

NNE : niveau normal du plan d'eau

PHE : plus hautes eaux

TABLE DE MATIERES

Résumé……... I

ملخص ……...II

Abstract ……..III

Liste des Figures……... IV

Liste des Tableaux ……VI

INTRODUCTION GENERALE……1

Chap1 : Choix du profil type du barrage

1. Les différents types de barrage..... 3

1.1 Barrages en béton 3

1.1.1 Barrages poids..... 3

1.1.2 Barrages en voûte..... 4

i) Barrages en voûte à angle constant :..... 5

ii) Barrages en voûte à rayon constant: 5

iii) Barrages en voûte à double courbure: 5

1.1.3 Barrages à contreforts 5

i) barrages à dalles dates: 6

ii) barrages à contreforts courbés: 6

iii) barrages à voûtes multiples:..... 6

iv) barrages à contreforts solidaires: 6

1.1.4 Les barrages en béton compacté au rouleau (BCR)..... 7

1.2 Barrages en terre 7

1.2.1 Les barrages en terre homogènes..... 8

1.2.2 Les barrages en terre à noyau étanche 8

i)Le barrage à noyau central..... 9

ii)Barrage noyau incliné 9

1.2.3 Les barrages en terre à masque amont..... 10

1 .3 Les organes d’étanchéités des barrages en terre 11

1.3.1 Noyau en argile compacté 11

1.3.2 Diaphragme interne 12

1.3.3 Masque amont 13

ii) Masque en béton bitumineux 13

iii) Masque en acier 14

iv)Masque en terre 14

1.3.4 Etanchéité des fondations des barrages en terre 14

i) Clé d'étanchéité 15

ii) Paroi moulée 15

iii) Tapis d'étanchéité amont 16

1.3.5 Etanchéité du massif 17

1.4 Avantages et inconvénients des différents types de barrages……... 17

1.5 Choix du site et du type de barrage **Erreur ! Signet non défini.**

1.5.1 Topographie et apports du bassin versant ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.5.2 Morphologie de la vallée 22

1.5.3 Géologie et conditions de fondation ..... **Erreur ! Signet non défini.**

i)Fondations rocheuses ..... **Erreur ! Signet non défini.**

ii)Fondations graveleuses ..... **Erreur ! Signet non défini.**

iii)Fondations sablo-silteuses 23

iv)Fondations argileuses 23

1.5.4 Matériaux disponibles ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.5.5 Crues et ouvrages hydrauliques ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.5.6 Critères économiques 25

1.5.7 Conclusion sur le choix du type de barrage **Erreur ! Signet non défini.**

Chap2 : Disposition de drainage dans les barrages en terre

2.1 Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**

2.2 Les filtres **Erreur ! Signet non défini.**

2.2.1 Rôle des filtres. ..... **Erreur ! Signet non défini.**

2.2.2 Composition des filtres 27

2.2.3 Dimensionnement des filtres ..... **Erreur ! Signet non défini.**

2.2.4 Epaisseur du filtre 29

2.3 Les drains 29

2.3.1 Définition 29

2.3.2 Rôle des drains ..... **Erreur ! Signet non défini.**

2.3.3 Différents types de drainages et leur dimensionnement **Erreur ! Signet non défini.**

i)Prisme de drainage ..... **Erreur ! Signet non défini.**

ii)Drainage de surface ..... **Erreur ! Signet non défini.**

iii) Le drain tapis interne ..... **Erreur ! Signet non défini.**

iv) Prisme de drainage avec drain tapis interne ..... **Erreur ! Signet non défini.**

v) Drainage a bande ..... **Erreur ! Signet non défini.**

vi) Drain vertical ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Chap3: Les infiltrations dans les barrages en terre

3.1 Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**

3.2 Equation de la ligne de saturation **Erreur ! Signet non défini.**

3.2.1 Distance entre les deux points d'intersection du plan d'eau avec la parabole théorique et le talus amont ..... **Erreur ! Signet non défini.**

i)Méthode de Casagrande. ..... **Erreur ! Signet non défini.**

ii)Méthode du changement du talus amont. 39

3.2.2 Détermination du point d'intersection de la ligne de saturation avec le talus aval. 39

3.2.3 Méthode de l'analogique électro- hydrodynamique : .... **Erreur ! Signet non défini.**

3.3 Détermination des pressions interstitielles. **Erreur ! Signet non défini.**

3.3.1 Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**

3.3.2Utilisation des réseaux d'écoulement ..... **Erreur ! Signet non défini.**

3.4 Influences de la ligne de saturation sur le comportement du barrage **Erreur ! Signet non défini.**

3.4.1 Stabilité hydraulique ..... **Erreur ! Signet non défini.**

i)Le renard ..... **Erreur ! Signet non défini.**

ii) La suffusion ..... **Erreur ! Signet non défini.**

iv)l'érosion interne ..... **Erreur ! Signet non défini.**

3.4.2 Stabilité mécanique ..... **Erreur ! Signet non défini.**7

3.5 Gradient hydraulique et vitesse critique de percolation **Erreur ! Signet non défini.**

Conclusion..... **Erreur ! Signet non défini.**

Chap4 : Etude comparative sur les variantes de conception des noyaux des barrages

4.1 Présentation du barrage, objet de l'etude **Erreur ! Signet non défini.**

4.2 Géologie et géotechnique : **Erreur ! Signet non défini.**

4.3 Objectifs recherchés à travers la modélisation : **Erreur ! Signet non défini.**

4.4Présentation du code de calcul SEEP/W 2007 **Erreur ! Signet non défini.**

4.4.1Fonction ..... **Erreur ! Signet non défini.**

4.4.2 Maillage ..... **Erreur ! Signet non défini.**

4.4.3 La schématisation du maillage suit les étapes suivantes. **Erreur ! Signet non défini.**

4.5 Etude des cas de la modélisation **Erreur ! Signet non défini.**

4.6 Résultat de la modélisation : **Erreur ! Signet non défini.**

4.6.1 Présentation :..... **Erreur ! Signet non défini.**

4.6.3 Variation du champs de pression interstitielle ..... **Erreur ! Signet non défini.**

4.6.4 Variation de l'effet contact entre les recharges et le noyau ..... **Erreur ! Signet non défini.**

4.6.5 Variation du volume des remblai du rayon..... **Erreur ! Signet non défini.**

4.7Conclusion..... **Erreur ! Signet non défini.**

Conclusion générale 72

References Bibliographiques

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La conception d'un barrage est très complexe car peu répétitive et c'est en fonction des conditions du site, des fondations, des matériaux disponibles et du coût de réalisation que le type de barrage est adopté, et il peut être souple ou rigide. La technique de construction des barrages est devenue un art batit sur des méthodes empiriques de plus en plus perfectionnées au fil du temps mais avec parfois des accidents meurtriers et très destructifs.

La technique de construction des digues en terre est de plus en plus privilégiée, même si elle est récente, elle ne cesse d'évoluer, seulement beaucoup de phénomènes restent non élucidés. Des méthodes ou des doctrines, sont peu ou pas du tout étudiées pour faire l'unanimité tant sur le plan économique que sur le plan de stabilité de l'ouvrage. Ainsi, si l'on se réfère aux statistiques des accidents survenus aux barrages à travers le monde, le problème des infiltrations, renards et sous pressions a causé plus de 40% des accidents recensés.

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.

Parmis les multiples conceptions des barrages en terre, deux d'entre- elles se démarquent par leur adoption plus ni moins généralisée. Il s'agit des barrages homogènes et à noyaux étanchés. La deuxième variante est souvent adoptée en cas d'insuffisance quantitative des matériaux imperméables.

Les barrages à noyau se classent en deux catégories principales. On distingue ceux à noyau central vertical et ceux à noyau incliné, avancé au niveau de la recharge amont.

Beaucoup de critères rentrent en jeu pour le choix du type de rayon à concevoir en l'occurrence :

- ✓ Perméabilité des recharges, en particulier celle amont
- ✓ Effet de contact entre le noyau et les recharges en relation avec les risques de Facturation hydraulique à la base de l'organe d'étanchéité
- ✓ Difficultés et délais de réalisation
- ✓ Distribution des champs de pressions interstitielles en liaison avec les critères d'érosion mécanique

Rapport-Gratuit.com

- ✓ Cubatures des remblais du noyau et aspects économique.

Partant de toutes ces considérations, le présent travail, vise une étude comparative entre les différentes variations de dispositions et de configuration du noyau des barrages en terre.

Par le biais de la modélisation, et en utilisant le code de calcul SEEP,version 2007,une analyse paramètres a été engagée sur six variantes de conception :

- ✓ Barrage à noyau central vertical avec recharges plus ou moins perméables
- ✓ Barrage à noyau central vertical avec recharges plus ou moins imperméables
- ✓ Barrage à noyau avancé incliné avec recharges plus ou moins perméables (deux variantes avec influence de la position du noyau)
- ✓ Barrage à noyau avancé incliné avec recharges plus ou moins imperméables (deux variantes avec influence de la position du noyau)

L'analyse des résultats a permis la comparaison entre les différentes variantes de la conception ainsi que des orientation pour le choix de celle la plus technico-économiquement faisable.

Pour aboutir à tous ces objectifs, le mémoire a été structuré en quatre chapitres à savoir :

- ✓ Chap1 : Choix du profil type du barrage
- ✓ Chap2 : Disposition de drainage dans les barrages en terre
- ✓ Chap3 : Les infiltrations dans les barrages en terre
- ✓ Chap4: Etude comparative sur les variantes de conception des noyaux des barrages

CHAP1

CHOIX DU PROFIL TYPE DE BARRAGE

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1. Les différents types de barrage :

1.1 Barrages en béton :

Il existe trois types de barrages en béton, les barrages poids, en voûtes et à contreforts. Ils sont pourvus de galeries qui donnent un accès à l'intérieur du barrage pour l'inspection, le contrôle du comportement du barrage.

Le problème majeur des barrages en béton est la fissuration dont les deux causes majeures sont:

- ✓ les réactions internes au barrage entre les différents composants du béton;
- ✓ les causes externes telles que le changement de température, le tassement des fondations et les charges dynamiques causées par les tremblements de terre. [1]

Les barrages en béton ont des points communs. D'une part, l'ouvrage est constitué de béton de masse, non armé, mis en place à une cadence élevée avec des moyens fortement mécanisés. D'autre part, de manière générale, la géométrie est optimisée de sorte à éviter l'apparition de tractions dans le béton en quelques points pour des conditions normales d'exploitation. Cependant, des contraintes de traction ou l'apparition de fissures ne mettant pas en cause l'intégrité structurale peuvent être tolérées en cas de charges exceptionnelles, tel un séisme. [2]

1.1.1 Barrages poids :

Les barrages poids sont définis comme étant les barrages qui sont construits en béton ou en maçonnerie et qui utilisent leur poids pour assurer leur stabilité Leur section Transversale a une forme Plus ou moins triangulaire dont la base est ancrée dans des fondations rocheuses; seul le poids du béton ou de la maçonnerie retient la force exercée par l'eau. [1]

La plupart du barrage-poids sons massifs Le parement amont est vertical ou légèrement incliné (moins de 5%). Le parement aval est incline avec un fruit de 75 a 80%. Cette géométrie lui permet de résister par son propre poids au renversement et au glissement sous l'action des forces extérieures. [2]

Ils offrent cependant l'avantage de pouvoir incorporer l'ouvrage d'évacuation de crues. Ils peuvent par cet aspect devenir très compétitifs, financièrement, si les débits de crues à évacuer sont importantes.

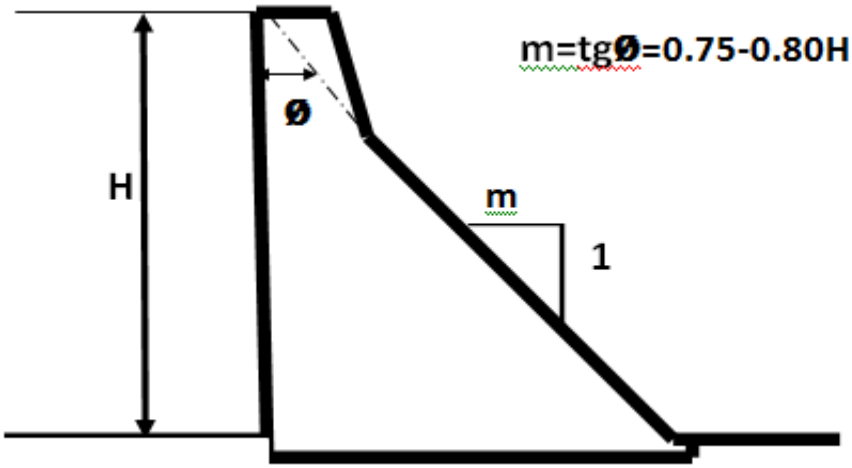

Fig. 1 : Coupe transversale d'un barrage poids

1.1.2 Barrages en voûte :

Un barrage en voûte est par définition un barrage en béton ou en maçonnerie dont l'épaisseur de la base est inférieure à 0.6 fois sa hauteur. En plan, sa coupe a une forme courbée ce qui lui permet de transférer la majeure partie des forces dues à l'action de l'eau sur ses parois vers les roches d'ancrage situées sur les deux rives. À cause de ce transfert des forces exercées par l'eau vers l'ancrage, il n'est donc pas nécessaire d'avoir autant de béton dans la structure que dans le cas des barrages poids. Cette propriété rend les barrages en voûte plus économiques et plus stables.

L'incorporation par contre des évacuateurs de crue est difficile et honéreuse puis qu'elle nécessite, en général, de grands massifs de support.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

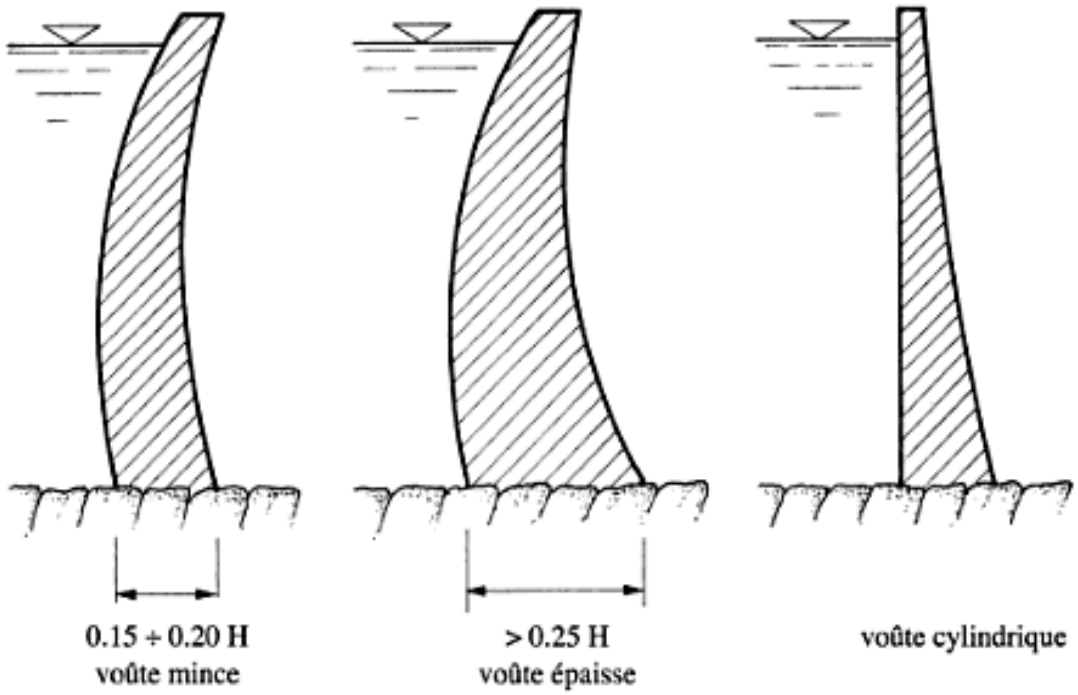

Fig.2 : Coupe transversal d'un barrage en voute

Les barrages en voûte sont classifiés en trois groupes:

i) Barrages en voûte à angle constant :

Ce sont des barrages en voûte dont l'angle sous-jacent d'une section horizontale reste constant du haut vers le bas .

ii) Barrages en voûte à rayon constant:

Ce sont des barrages en voûte ou chaque segment d'une section horizontale du barrage a un même rayon de courbure.

iii) Barrages en voûte à double courbure:

Ce sont des barrages en voûte qui ont une courbure horizontalement et verticalement.[1]

1.1.3 Barrages à contreforts :

Un barrage à contreforts consiste en une structure étanche supportée à des intervalles réguliers par une série de contreforts.

Leur utilisation est idéale dans le cas des terrains dont les fondations sont perméables. Ce sont des barrages économiques car ils demandent moins de béton que les barrages poids et ils sont généralement construits dans un délai plus court. Les endroits critiques où les déformations sont susceptibles d'apparaître sont les joints qui séparent les différents blocs de béton.

Les barrages à contreforts peuvent avoir les formes suivantes:

i) barrages à dalles dates:

Ce sont des dalles de forme rectiligne soutenues à intervalle régulier par les contreforts.

ii) barrages à contreforts courbés:

Ce sont des barrages à contreforts dont la forme de la vue en plan est courbée.

iii) barrages à voûtes multiples:

Ce sont des barrages à contreforts dont la face amont est formée d'une série de voûtes;

iv) barrages à contreforts solidaires:

Ce sont des barrages formés de contreforts dont les extrémités sont un peu allongées pour combler le vide existant entre eux. [1]

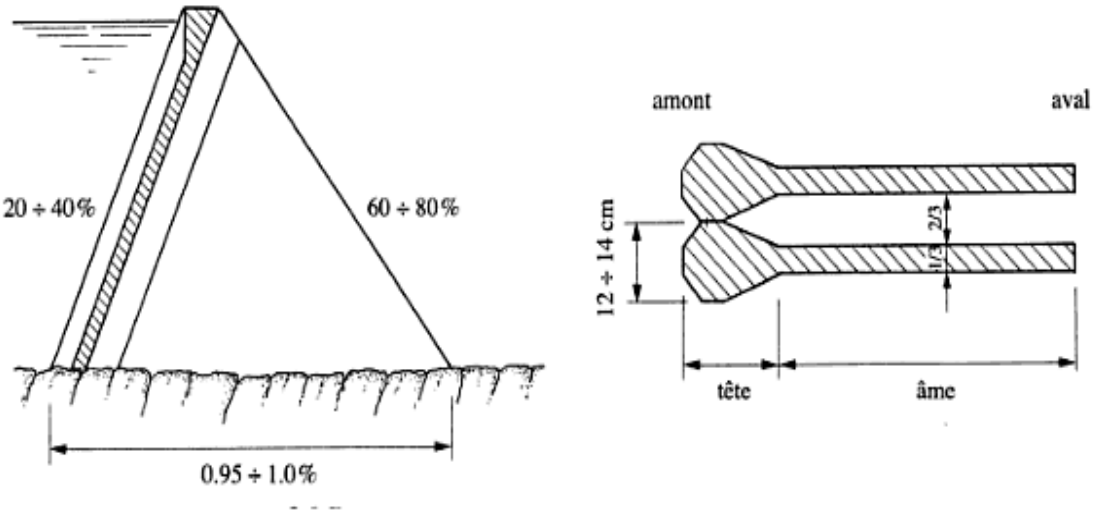

Fig.3 : Coupe transversael d'un barrage à contreforts

1.1.4 Les barrages en béton compacté au rouleau (BCR) :

Depuis la fin des années 1970, une nouvelle technologie c'est développée pour optimiser la construction de barrages poids: le bêton compacté au rouleau BCR (Roller Compacted Concrete, RCC). La mise en place de béton BCR permet d'utiliser des bétons très secs, très faiblement dosés en ciment. Les résistances obtenues, particulièrement faibles, sent compatibles avec les exigences des barrages poids qui s'opposent à la poussé de l'eau par leur poids propre. On exploite au mieux les propriétés du béton en mettant en œuvre des techniques de mise en place et de compactage qui sont issues des barrages en remblai, de façon à minimiser les mains-d'œuvre nécessaire à la construction. [3]

1.2 Barrages en terre :

Les barrages en remblai (digues) sont constitués essentiellement de matériaux granulaires naturels meubles prélevés à proximité immédiate de l'ouvrage. On distingue deux catégories de barrages en remblai :

- ✓ Les barrages en terre, réalisés essentiellement à partir de sol naturels meubles prélèves dans des zones d'emprunt;
- ✓ Les barrages en enrochements, dont le majeur partie est constitué de matériau de carrière concassé.

Comme pour les autres types de barrages, les barrages en remblai doivent répondre à deux fonctions essentielles: la fonction statique, qui consiste à transmettre à la fondation la poussée de l'eau retenue à l'amont et la fonction de coupure étanche.

Les sols meubles des barrages en terre peuvent, selon leurs caractéristiques géotechniques, être suffisamment imperméables pour suffire aux deux fonctions. [2]

L'utilisation de matériaux locaux généralement bon marché surtout par une mécanisation presque totale des travaux, a au fils du temps imposé le type de barrage en terre comme la solution idéale.

L'utilisation des matériaux locaux généralement bon marché et leurs disponibilités à proximité du site fait que la solution barrage en remblais est intuitivement choisie par rapport aux autres types de barrages considérés rigides et s'adaptent difficilement aux assises non rocheuses.

Les barrages en terre compactés peuvent être divisés en trois principaux types : les ouvrages en terre homogènes, ceux à noyaux étanches et ceux à masques amont.

1.2.1 Les barrages en terre homogènes :

Ils sont totalement construits avec un seul matériau qui est le plus souvent argileux remplissant simultanément les deux fonctions d'écran et de masse. Ce matériau doit présenter des caractéristiques permettent de garantir une étanchéité suffisante et une stabilité du remblai.

Leur simplicité a permis de développer une technique de réalisation bien maîtrisée tout en assurant une grande sécurité, néanmoins ce type de barrage est surtout adopté pour la réalisation de retenue collinaire et de petits barrages.

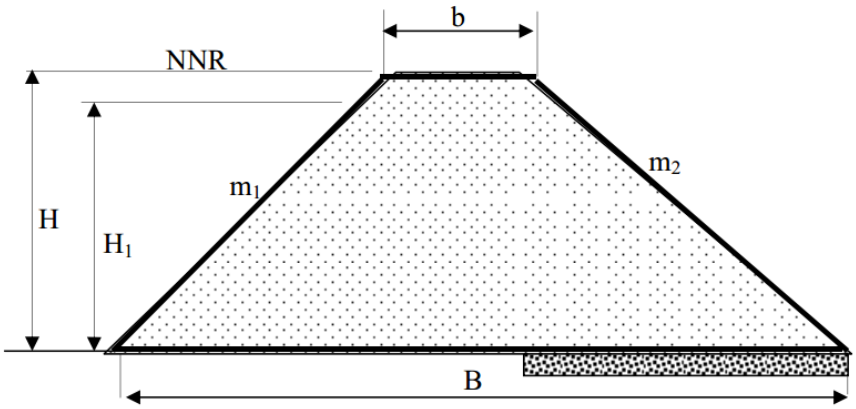

Fig.4 : Barrage en terre homogène

Lorsque la perméabilité du sol d'emprunt principal est trop importante, la solution consiste à concevoir un barrage en remblai zoné, c'est-a-dire constitué de plusieurs matériaux repartis par zones dans le corps du barrage.

Les matériaux de carrière avec lesquels sont constitués les barrages en enrochements sont toujours perméables. Ces enrochements sont donc toujours associés à un autre élément assurant la fonction d'étanchéité. [3]

1.2.2 Les barrages en terre à noyau étanche :

Dans le cas où la quantité des matériaux imperméables disponibles sur site est insuffisante pour réaliser tout le corps du barrage, on opte le plus souvent pour un ouvrage à zones avec un noyau en argile assurant l'étanchéité.

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

Par contre, pour les ouvrages importants, les matériaux grossiers de recharges sont plus résistants que les matériaux argileux, on peut donc construire des talus plus raides et on contrôle mieux les écoulements dans le corps du barrage.

Notons que le noyau étanche peut être vertical ou incliné et parfois remplacé par un diaphragme en béton au ciment ou bitumineux. [4]

i)Le barrage à noyau central :

Le barrage à noyau est composé d'un noyau central, constitué d'un matériau imperméable, et de recharges, c'est-à-dire une couche supérieure qui recouvre les flancs du noyau.[2]

La stabilité du massif sera assurée par des zones perméables appelées recharges Ces recharges peuvent être au nombre variables et disposées différemment d'un barrage à un autre en fonction de la nature du matériau et des conditions spécifiques à chaque barrage. [4]

Les recharges peuvent être constituées d'enrochements ou d'alluvions. Elles permettent d'assurer la stabilité du barrage, alors que le noyau central assure son étanchéité. [3]

Il est Plus stable qu'un barrage homogène, grâce aux recharges, les barrages à noyaux permettent de construire des talus plus raides.

De plus le risque d'écoulement dans le corps du barrage est plus limité grâce à ces enrochements. [2]

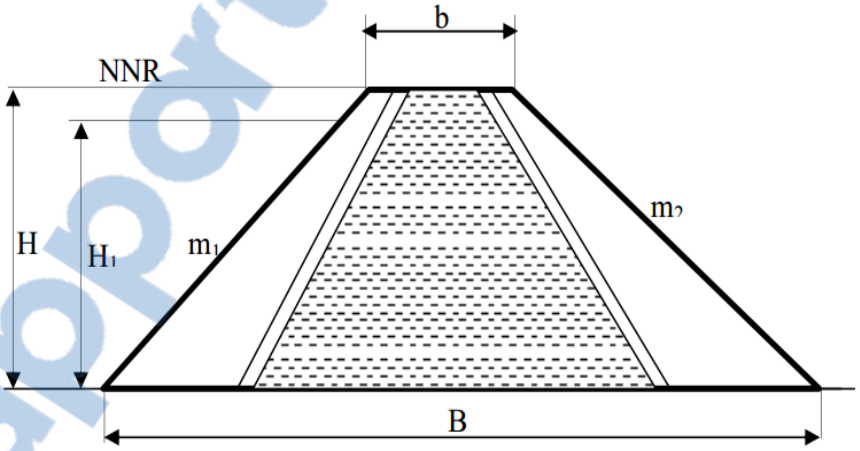

Fig.5 : Barrage à noyau central

ii)Barrage noyau incliné :

L'élément étanche ou très peu perméable, comme par un noyau en limon argileux peut dans certains cas être déplacé vers l'amont jusqu'à l'élimination complète du corps amont .On obtient la solution d'une digue à noyau incliné.

Rapport-Gratuit.com

Plus le noyau est incliné plus la pente du parement amont est conditionnée par les propriétés mécaniques du matériau du noyau.

Les surfaces potentielles de glissement traversent le noyau et la pente du parement amont est donc plus douce pour garantir la stabilité. La masse du corps d'appuis aval augmente également ce qui représente un certain a tout pour le barrage. [3]

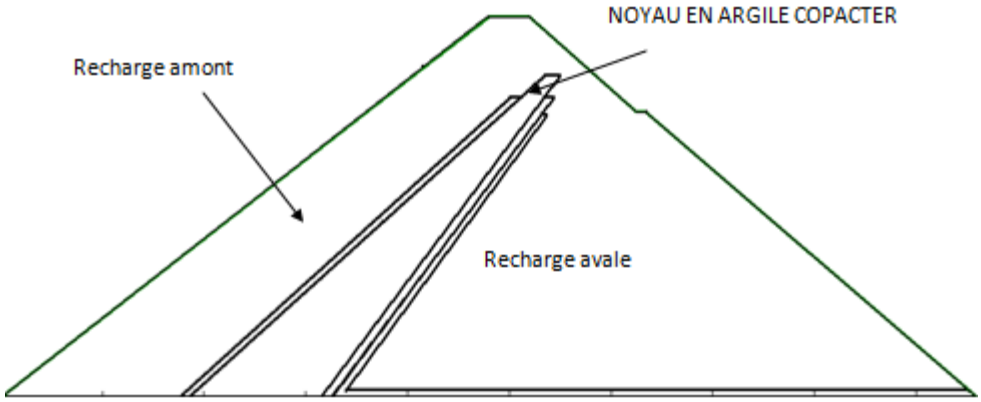

Fig6 : ***Barrage noyau incliné***

1.2.3 Les barrages en terre à masque amont :

Les barrages en terre à masque sont des remblais perméables avec un écran imperméable appelé masque placé sur le parement amont.

Le corps du barrage est construit avec un matériau quelconque pour autant qu'il soit peu déformable et pouvant assurer la stabilité au glissement de l'ensemble de l'ouvrage. [3]

Le masque qui assure l'étanchéité peut être en béton, en produits bitumineux ou en géo membrane. La présence de ce masque sur le parement amont présente un double avantage de pouvoir faire des réparations en cas de dégradation du masque et de permettre de faire des vidanges rapides sans risque de glissements. [4]

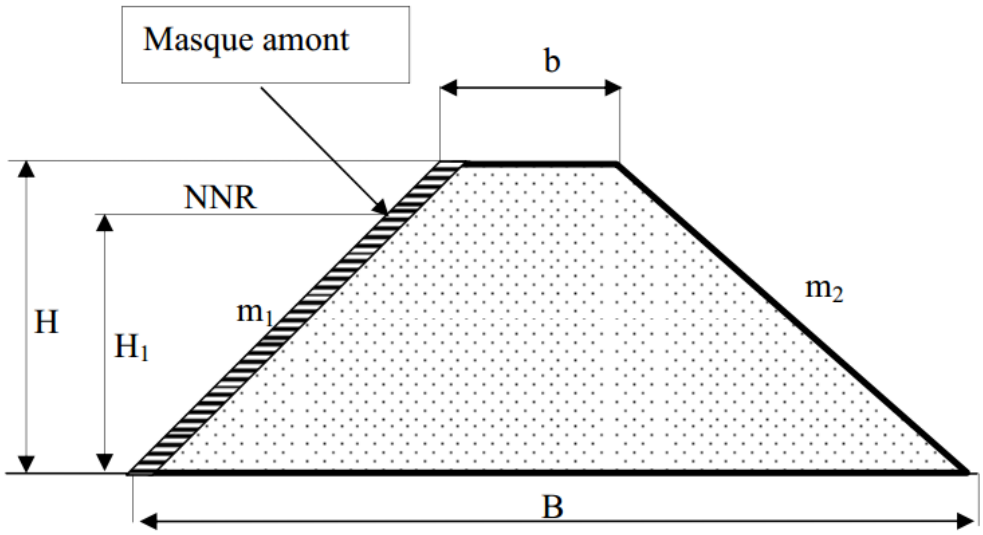

Fig.7 : Barrage en terre à masque amont

1 .3 Les organes d'étanchéités des barrages en terre :

On prévoit un organe d'étanchéité dans un barrage en terre lorsque les matériaux constituant le remblai ne sont pas suffisamment imperméables pour empêcher de grandes pertes d'eau par infiltration.

On rencontre plusieurs types d'organes d'étanchéité, ceux réalisés en matériaux locaux et ceux en matériaux artificiels.

1.3.1 Noyau en argile compacté :

Le noyau en matériau argileux compacts, dispose verticalement au centre du barrage ou en position inclinée a l'amont de celui-ci, son épaisseur est de l'ordre de 1/6 de l' hauteur de ouvrage

Vera le sommet le noyau doit être monte au dessus des plus hautes eaux et pratiquement, acompte tenu des remontées capillaires, jusqu'a la tète du barrage. II doit être protégé de la dessiccation a sa partie supérieure pour éviter toute fissure de retrait qui risquerait de se révéler,-:, catastrophique. Cette protection peut être assurée par une couche de sable ou de préférence, en traitant le sommet du barrage en chemin avec une chaussée en enrobe bitumineux. Latéralement, nous disposons de part et d'autre du noyau un drain filtre, vers l'aval pour -cueillir les eaux de percolation, vers l'amont pour absorber les eaux de ressuyage âpres vidange. il fait assurer la continuité de l'étanchéité en raccordant celle-ci a la fondation imperméable ou au dispositif d'étanchéité des fondations. [5]

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

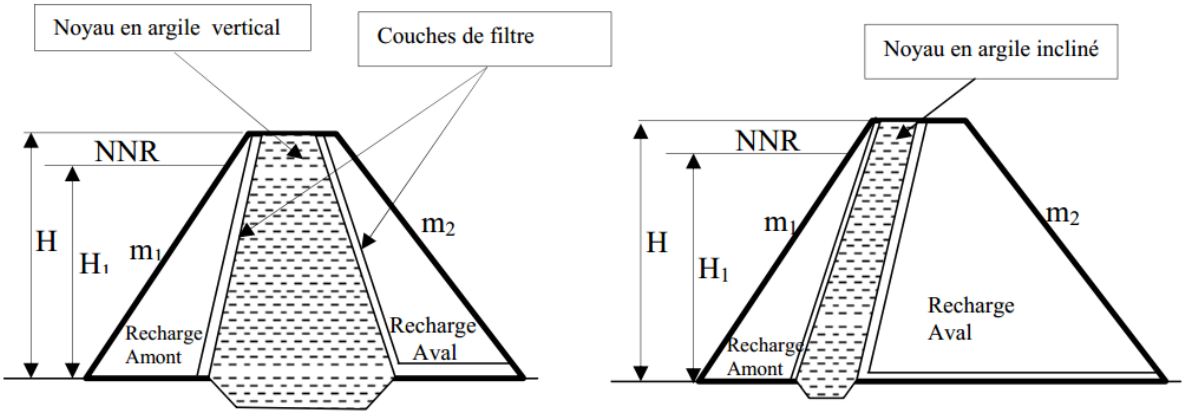

Fig.8 : Etanchéité par noyau en argile compacté

1.3.2 Diaphragme interne :

L'étanchéité des barrages en terre au moyen de noyaux bitumineux a pris un très grande importance dans le monde entier et dans toutes les zones climatiques ; cet élément d'étanchéité (mieux que plus part des autres) satisfait, en effet, aux exigences de sécurité les plus strictes grâce à sa déformation, sa bonne résistance à l'érosion et au vieillissement, et surtout grâce mode de construction sans joints. [5]

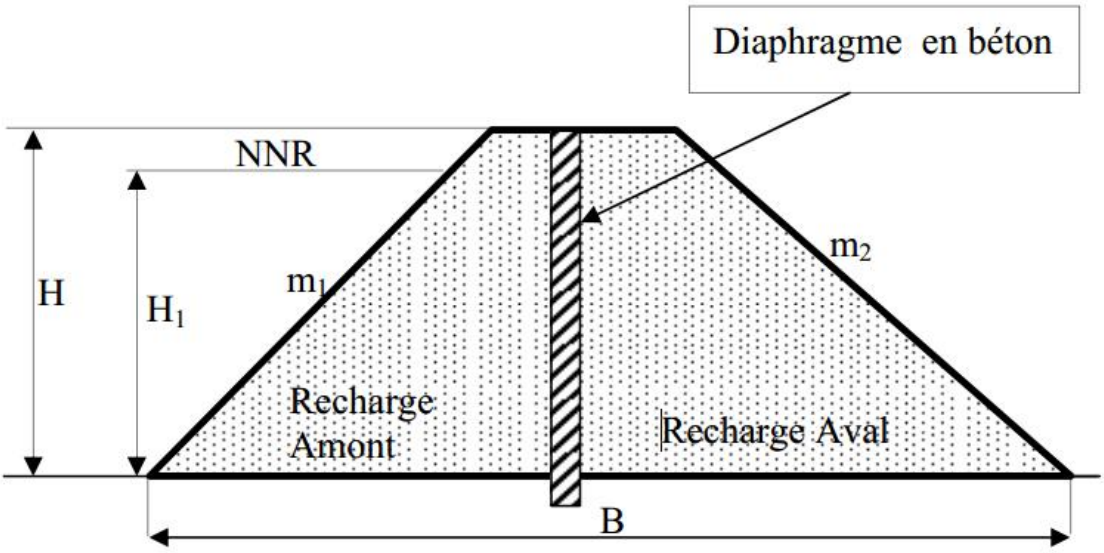

Fig.9 : Barrage à diaphragme interne

1.3.3 Masque amont :

Le masque amont qui constitue l'organe d'étanchéité est classiquement exécuté en béton de ciment, en béton bitumineux ou en géomembrane. Il a une épaisseur réduite, ce qui lui permet de s'accommoder aux déformations du massif support.

i) Masque en béton de ciment :

La dalle doit posséder des joints de construction, du fait du retrait, que l'on munit de lames d'étanchéité. Ces joints sont respectivement parallèles et perpendiculaires aux lignes de plus grande pente du talus, ces dernières étant nécessaires pour diminuer ('importance des efforts de flexion [5].

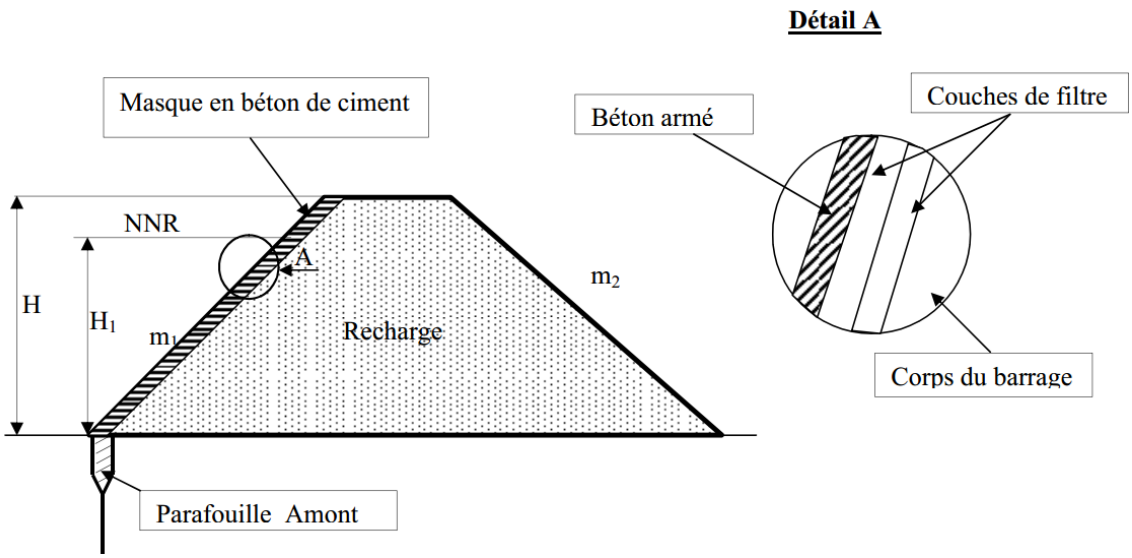

Fig.10: Barrage à masque en béton de ciment

ii) Masque en béton bitumineux :

C'est a priori le produit idéal en raison de sa remarquable étanchéité et de sa résistance à flexion. Si certaines fissures se produisent, elles se colmatent d'elles mêmes peu à peu sous l'effet de la pression de l'eau, par déformation plastique. Grosso modo, un béton bitumineux agit de façon plastique aux déformations lentes, de façon élastique aux déformations rapides, or le tassement s'effectue en général de façon lente. Egalement, il n'y a pas de problème de oint, les différentes couches de béton bitumineux se soudent littéralement a chaud. . [5]

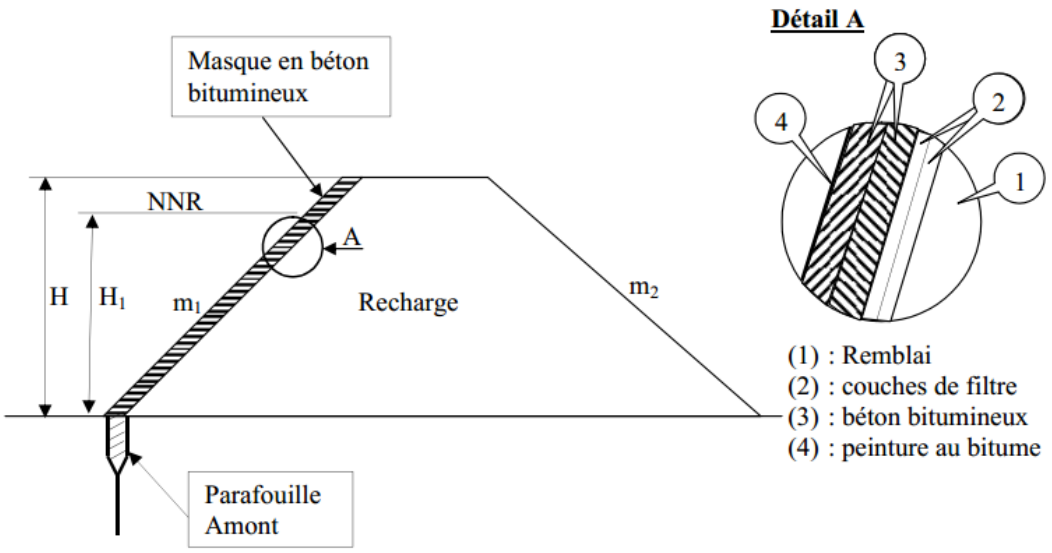

Fig.11 : Barrage à masque en béton bitumineux

iii) Masque en acier :

En raison de la grande déformabilité alliée a une résistance élevée et une étanchéité faite de l'acier, celui-ci constitue un matériau techniquement a peu prés parfait pour un asque amont. L'inconvénient en est généralement une question de coût .

iv) Masque en terre :

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

1.3.4 Etanchéité des fondations des barrages en terre :

On peut considérer les trois cas suivants pour les barrages de types homogènes et zonés:

- ✓ cas d'une fondation constituée de matériaux peu perméables: il est recommande d'exécuter une clé d'étanchéité en matériaux argileux compactes afin de tenir compte de la fissuration superficielle et d'hétérogénéités éventuelles.

- ✓ cas d'une fondation ou la présence de couches perméables n'a êta mise en évidence que jusqu'a une profondeur de quelques mètres: Is clé d'étanchéité doit les barrer et être ancrée dans le niveau étanche ; si ce dernier est le rocher sain, âpres son nettoyage et une régularisation éventuelle de sa surface, mise en place d'une première couche d'épaisseur décimétrique constituée d'argile humide permet d'assurer un bon contact ; it peut être

nécessaire d'interposer un filtre entre la face aval de la clé et les matériaux perméables de la fondation.

- ✓ Cas d'une fondation perméable jusqu'a une profondeur importante : les injections sont utilisables aussi bien dans le cas de fondation meuble que dans celui de massifs rocheux plus ou moins fissures, les produits d'injection étant adaptes au matériau traite (coulis bentonite-ciment, coulis spéciaux) ; la coupure comporte le plus souvent trois lignes de forages : [5]

i) Clé d'étanchéité :

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

Cette solution est adoptée lorsque l'épaisseur de la couche imperméable n'est pas très grande car l'exécution de la tranchée et son remblayage se fait d'une manière mécanique. [4]

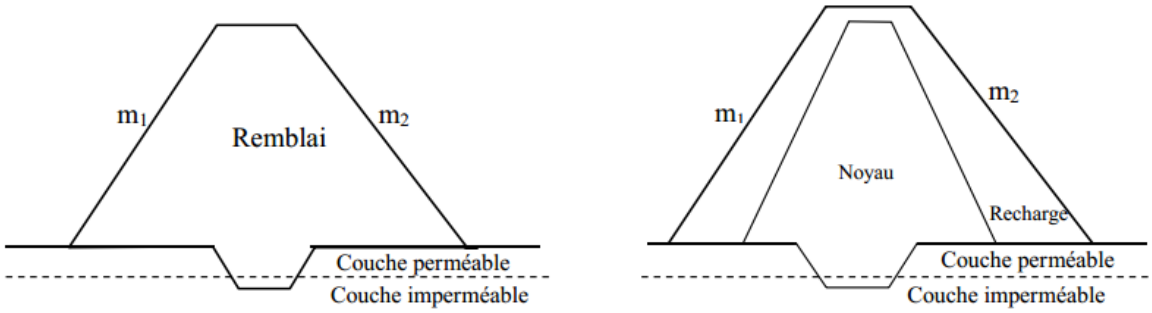

Fig.12 : Clé d'étanchéité réalisée dans les fondations de barrage en terre

ii) Paroi moulée :

Cette solution est assez classique dans les terrains meubles; elle t aussi possible dans les fondations rocheuses selon la technique, plus couteuse, de hydro fraise. Elle peut entrainer des désordres si des déplacements importants se produisent, par exemple le poinçonnement inverse du remblai dans le cas d'un fort tassement de la nidation meuble (risque aussi d'un frottement latéral excessif) ; si elle est située au pied amont du remblai, la paroi peut subir un cisaillement important dans sa partie supérieure. [4]

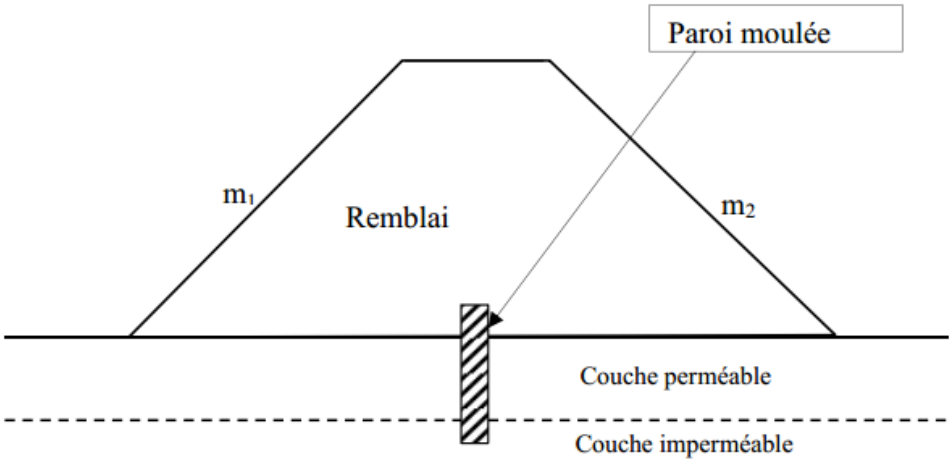

Fig.13 : Barrage à paroi moulée

iii) Tapis d'étanchéité amont :

Lorsque l'étanchéité de la retenue ne peut pas être réalisée par une coupure au droit du arrange, la solution consiste a étancher la cuvette totalement ou partiellement a l'aide d'une géomembrane du d'un tapis en matériaux argileux compactes (au minimum deux couches épaisseur de 0,20 mètre chacune), ces derniers étant à protéger contre tout risque de dessiccation. Ces techniques conduiront nécessairement à un prix du m^3 d'eau stockée.

En ce qui concerne le support il faut :

- ✓ respecter les conditions de filtres dans le cas du tapis amont ;
- ✓ éliminer les aspérités susceptibles de perforer la geomembrane ;
- ✓ éviter tout risque de sous-pression, notamment gazeuse, sous la geomembrane. [5]

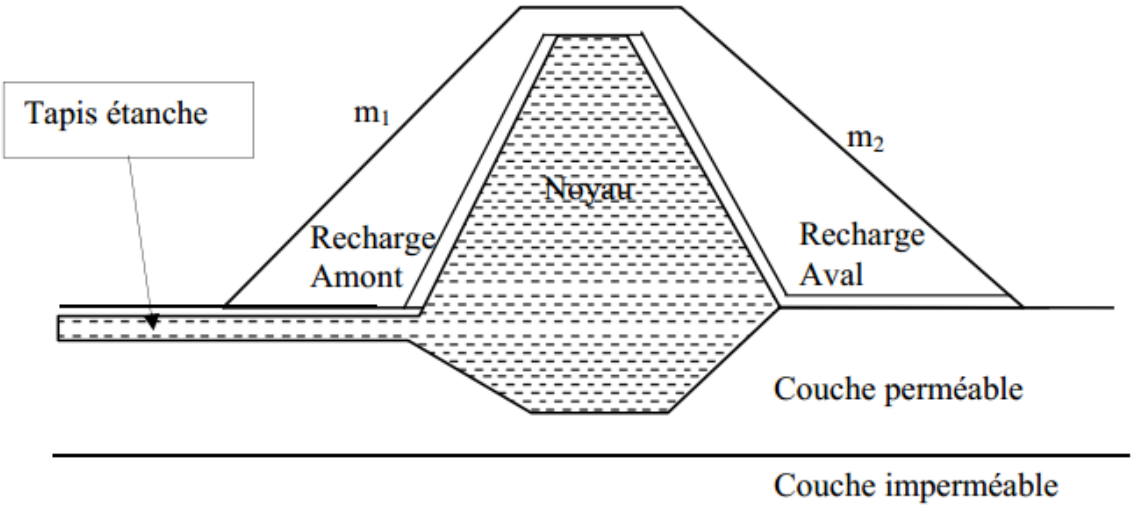

Fig.14 : Barrage avec tapis amont

iv) Etanchéité du massif :

Le problème de I ‘étanchéité du massif se pose chaque fois que le calcul des infiltrations superstructure indique des pertes inadmissibles. Ces pertes peuvent soit entrainer la ruine de l'ouvrage par formation de renard, soit encore, sans nuire a sa sécurité, être gênantes pour exploitation du barrage.

1.4 Avantages et inconvénients des différents types de barrages :

Les avantages et particularités essentielles des principaux types de barrage sont énumères sur le tableau N°1:

Type de barrage	Avantages	Inconvénients
Barrage-poids	✓ Faibles contraintes dans le béton. ✓ Faibles contraintes transmises au rocher. ✓ Les variations de température ne produisent que des contraintes faibles. ✓ Gradient des sous-pressions sous la fondation faible. ✓ Evacuateur de crue pour facilement être intégré.	✓ Volume d'excavation important. ✓ Volume de béton important. ✓ Refroidissement artificiel nécessaire lors de la prise du béton. ✓ Sous-pressions importantes sous la fondation. ✓ Sensibilité aux tassements. ✓ Sensibilité aux séismes.
Barrage à contreforts	✓ Volume de béton plus faible que pour le barrage-poids. ✓ Contraintes moyennes transmises au rocher. ✓ Faibles sous-pressions sous la fondation. ✓ Échauffement faible lors de la prise du béton. ✓ L'évacuateur de crues peut facilement être intégré**.**	✓ Volume d'excavation important. ✓ Gradient des sous-pressions sous la fondation localement très important. ✓ Contraintes de température peuvent être importantes dans la tête. ✓ Risque limite de tassements. ✓ Grande sensibilité aux séismes.

Barrage-poids évidé	✓ Volume de béton plus faible. ✓ Réduction des sous-pressions au contact béton-rocher.	✓ Augmentation du gradient hydraulique de l'écoulement souterrain a proximité de la fondation.
Barrage en béton compacté au rouleau (BCR)	✓ Faible dosage en ciment. ✓ Teneur en eau réduite. ✓ Surface de coffrage restreint. ✓ Extinction rapide ✓ Emprise réduite par rapport au barrage-poids. ✓ Mise en place sur grande surface par couches minces. ✓ Faible cout de construction. ✓ Délais de réalisation réduits. ✓ Problèmes liés à la température écartés	✓ Requiert des fondations sur rocher. ✓ Mise en place M compactage identiques aux barrages en remblai. ✓ Limitation des percolations par la mise en place d'un revêtement du parement amont. ✓ Pas de systèmes de refroidissement artificiel du bêton. ✓ Bonne résistance en cas de séisme, de submersion. ✓ Possibilité d'incorporer un évacuateur de crue de surface, des galeries de contrôle et des puits.

pport-Gratuit.com

Barrage à voutes multiples	✓ Volume de béton faible. ✓ Volume d'excavation relativement faible. ✓ Faibles sous-pressions sous la fondation. ✓ Pas de problèmes thermiques lors de la prise du béton dans le cas des ouvrages minces.	✓ contraintes importantes dans les voutes. ✓ Nécessité d'armer les voutes pour limiter la fissuration. ✓ Sensibilité aux gradients de température. ✓ Gradient des sous-pressions sous la fondation localement tees important. ✓ Sensibilité aux tassements différentiels, grande sensibilité au séisme. ➢ Intégration des ouvrages annexes difficile. ➢ Structure très vulnérable et très exposés aux actions de malveillance.
Barrage-voute	✓ Volume de béton faible, ✓ Volume d'excavation relativement faible. ✓ Faibles sous-pressions sous la fondation. ✓ Haute résistance au séisme.	✓ Contraintes importantes dans le béton. ✓ Contraintes importantes dans le rocher sous la fondation. ✓ Efforts transmis obliquement aux appuis latéraux. ✓ Sensibilité limité aux tassements (hyperstaticité). ✓ Echauffement durant la prise du béton pouvant nécessiter des mesures particulières. ✓ Gradient de sous pression sous la fondation important. ✓ Drainage des fissures des massifs d'appui devant être rigoureusement traités. ✓ Difficulté d'intégration de l'évacuateur de crues dans le barrage.

Barrage en remblai à noyau central	✓ Corps du barrage très flexible s'adaptant aux conditions de terrain. ✓ Structure très peu sensible aux tassements et aux séisme. ✓ Excavations limitées. ✓ Contraintes très faibles sur le sol de fondation, gradient hydraulique faible dans le noyau et dans in fondation	✓ Volume de matériau a mettre en place très important. ✓ Disponibilité de matériau argileux en grande quantité à proximité du site. ✓ Mise en place du noyau argileux impossible lors de conditions météorologiques défavorables.
Barrage en remblai a masque amont	✓ Corps du barrage très flexible s'adaptant aux conditions du terrain. ✓ Structure peu sensible aux tassements globaux. ✓ Structure peu sensible aux séismes si des mesures spécifiques sont prévues. ✓ Excavations limitées ✓ Pas de matériaux argileux à mettre en place, ✓ Pas d'exigences particulières en ce qui concerne les conditions météorologiques. ✓ Contraintes très faibles sur le sol de fondation.	✓ Volume de matériau à mettre en place tees important. ✓ Gradient hydraulique important sous la fondation de la plinthe. ✓ Fondation de In plinthe sur du rocher peu perméable. ✓ Structure sensible aux tassements différentiels du masque rigide et du remblai (enrochements).

1.5 Choix du site et du type de barrage :

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

- ✓ la zone sismique
- ✓ la topographie et les apports du bassin versant ;
- ✓ la morphologie de la vallée ;
- ✓ les conditions géologiques et géotechniques ;
- ✓ le contexte météorologique et le régime des crues.

Dans plusieurs cas, après considération de ces aspects, plusieurs types de barrages resteront possibles. Des considérations économiques permettront alors de départager les solutions. [7]

1.5.1 Topographie et apports du bassin versant :

Si l'on excepte le cas des plans d'eau à vocation touristique et les petits barrages hydroélectriques,

C'est le volume de la retenue qui conditionne toute la conception du barrage.

On cherche en effet à disposer d'un volume d'eau pour le soutien d'étiage, l'irrigation ou l'eau potable, ou bien d'un volume disponible pour amortir une crue.

Le tout premier travail consiste donc à calculer le volume d'eau d'une cuvette, en plusieurs sites éventuellement.

Le deuxième travail consiste à vérifier si le bassin versant autorise le remplissage de la retenue et à calculer avec quel risque de défaillance.

1.5.2 Morphologie de la vallée :

Tout barrage est nécessairement lié à son environnement. La morphologie de la vallée joue un rôle important dans le choix du site du barrage et du type d'ouvrage le mieux adapté. Bien entendu, l'emplacement idéal et le plus économique est celui d'un site étroit, précédé à l'amont par un élargissement de la vallée, à condition que les appuis du barrage soient sains (resserrement indépendant d'une zone d'éboulement ou d'un glissement). Ce type de site est

peu fréquent, soit parce qu'il n'existe pas toujours de resserrement de vallée dans la nature, soit parce que le choix du site n'obéit pas toujours aux seules considérations techniques. [7]

En première approximation, une vallée large conviendra mieux à l'aménagement d'un barrage en remblai. Un site étroit conviendra aussi à un barrage poids et un site très étroit conviendra aussi à une voûte. Tout cela bien sûr sous réserve que les fondations le permettent.

1.5.3 Géologie et conditions de fondation :

La nature, la résistance, l'épaisseur, le pendage, la fracturation et la perméabilité des formations rencontrées au droit du site constituent un ensemble de facteurs souvent déterminants dans la sélection du type de barrage. [8]

ii) Fondations rocheuses :

Sauf en cas de roches très fissurées ou de caractéristiques très médiocres, les fondations rocheuses se prêtent à l'édification de tous types de barrages, moyennant des dispositions adéquates concernant la purge des matériaux très altérés et le traitement éventuel par injection. L'aspect important est le régime des fractures (failles, joints, diaclases, schistosité).

Les barrages en remblai conviennent toujours. Pour les autres, les exigences vont en croissant du BCR, au béton conventionnel et à la voûte. [2]

ii) Fondations graveleuses :

Sous réserve qu'elles soient suffisamment compactes, ces fondations conviennent en général pour des barrages en terre ou en enrochements, du moins au plan mécanique. Le contrôle des fuites doit être assuré par un dispositif d'étanchéité et de drainage approprié.

Dans la pratique, ce type de fondation se rencontre surtout pour les rivières ou fleuves à débit important. L'ouvrage doit donc évacuer des crues importantes, ce qui exclut les barrages en terre. Des barrages en béton de très petite hauteur peuvent également être édifiés moyennant des précautions concernant les fuites et les percolations (risque de renard) et les tassements différentiels. [8]

iii) Fondations sablo-silteuses :

Des fondations de silt ou de sable fin peuvent convenir à l'édification de barrages en terre, voire exceptionnellement à de très petits barrages poids en béton moyennant de sérieuses précautions.

iv) Fondations argileuses :

Des fondations argileuses impliquent presque automatiquement le choix de barrages en remblai, avec des pentes de talus compatibles avec les caractéristiques mécaniques des formations en place.

1.5.4 Matériaux disponibles :

La disponibilité sur le site, ou à proximité, de matériaux utilisables pour la construction d'un barrage a une incidence considérable, souvent même prépondérante sur le choix du type de barrage :

- ✓ Sols utilisables en remblai ;
- ✓ Enrochements pour remblai ou protection de talus (rip-rap) ;
- ✓ Agrégats à béton (matériaux alluvionnaires ou concassés) ;
- ✓ Liants (ciment, cendres volantes ...).

La possibilité d'extraire ces matériaux de l'emprise de la retenue permet d'accroître la capacité de stockage. En outre, cela minimise généralement les coûts de transport et de remise en état des zones d'emprunts.[9]

D'une manière générale, si l'on dispose de sols limoneux ou argileux de qualité (teneur en fines, plasticité, état) et en quantité suffisante (1,5 à 2 fois le volume du remblai), la solution barrage en terre homogène ou pseudo-zoné - en réservant les matériaux les plus grossiers en recharge aval - s'impose comme la solution plus économique, du moins tant que les débits de crue à évacuer demeurent modestes.

Si l'on dispose de matériaux imperméables en quantité limitée, et par ailleurs de matériaux grossiers ou d'enrochements, il est envisageable de construire un barrage en terre zoné ou en enrochements avec noyau. Cette solution présentel'inconvénient d'une mise en œuvre par zones, d'autant plus compliquée que le site est restreint et contrarie l'évolution des engins.

Si l'on ne dispose que de matériaux grossiers, ceux-ci peuvent être exploités pour édifier un remblai homogène, l'étanchéité étant assurée par une paroi au coulis construite après montée du remblai en son centre, ou par une étanchéité amont artificielle (béton, membrane ou béton bitumeux).

Si l'on ne dispose que d'enrochements, un barrage en enrochements compactés avec étanchéité rapportée sur le parement amont éventuellement adouci (membrane, masque en béton hydraulique ou béton bitumineux) conviendra.

La solution béton, en particulier la solution BCR, peut également s'avérer compétitive, sous réserve de fondation suffisamment bonne (rocher ou terrain compact) ne nécessitant pas de fouilles excessives. [2]

1.5.5 Crues et ouvrages hydrauliques :

Le coût des ouvrages d'évacuation des crues dépend des caractéristiques hydrologiques du bassin versant.

Dans le cas de bassin versant étendu et de crues prévisibles sévères, il peut être intéressant de combiner évacuateur de crues et barrage dans un ouvrage en béton déversant.

Au contraire, un déversoir de petites dimensions favorise plutôt le choix d'un barrage en remblai, toutes choses égales d'ailleurs.

Lorsque la construction d'un évacuateur requiert des excavations significatives, la possibilité d'utiliser les produits de déblais favorise aussi un barrage en remblai.

Lorsqu'une galerie est requise pour assurer la dérivation provisoire du cours d'eau durant les travaux, cette galerie peut être avantageusement intégrée aux ouvrages d'évacuation des crues, moyennant, si besoin est, une légère augmentation de sa section Le choix d'un barrage en BCR peut s'avérer attractif, dans la mesure où il permet de comprimer les délais d'exécution et de s'affranchir des risques liés à l'arrivée d'une crue qui obligerait, dans les autres solutions, à des ouvrages de dérivation ou de protection onéreux.[8]

1.5.6 Critères économiques :

Dans plusieurs cas, les considérations précédentes auront permis de retenir plusieurs types de barrage. Par exemple, des fondations rocheuses, la présence de matériaux meubles proches du site, un débit de crue important, conduiront à mettre en balance un barrage en BCR et un barrage en terre équipé d'un évacuateur de crue coûteux.

Il convient alors de poursuivre les études pour les deux types d'ouvrages, en veillant à affiner les estimations de coût au fur et à mesure de la progression des études. Dès que l'un des types de barrages paraît significativement plus économique, il est préférable de ne pas s'entêter sur l'autre option.[9]

1.5.7 Conclusion sur le choix du type de barrage :

Le choix du type de barrage s'impose tout naturellement dans bien des cas, sans qu'il soit nécessaire de faire des investigations poussées. Ainsi, lorsque le substratum rocheux est à une profondeur supérieure à environ 5 mètres, seul un barrage en remblai est raisonnablement envisageable, du moins pour les ouvrages de hauteur inférieure à 25 mètres. Dans certaines régions, le contexte géologique est tel que le type de barrage est presque toujours le même.

Dans d'autres cas, le choix du type de barrage sera un compromis entre les différents aspects suivants : nature de la fondation, disponibilité de matériaux à proximité, hydrologie, pour aboutir au meilleur choix économique. Mais il y aura toujours intérêt à choisir le plus rapidement possible, en règle générale à l'issue des études de faisabilité.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CHAP2

DISPOSITION DE DRAINAGE DAN LES BARRAGES EN TERRE

2.1 Introduction :

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

2.2 Les filtres :

2.2.1 Rôle des filtres :

Les filtres sont de minces couches successives de matériaux perméables dont la grosseur des éléments augmente dans la direction de l'écoulement. Ces filtres doivent assurer une transition entre une couche à granulométrie donnée vers une couche à granulométrie plus grossière. Si un filtre est constitué par plusieurs couches chacune doit jouer le rôle de filtre vis-à-vis de la précédente. [9]

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

Parmi leurs rôles on peut citer :

- ✓ Entreposés entre deux couches à granulométrie 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 grandement à activer sa consolidation grâce à leur rôle drainant qui réduit les pressions internes. [9]

2.2.2 Composition des filtres :

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

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

2.2.3 Dimensionnement des filtres :

Les paramètres de base de ces règles sont les caractéristiques granulométriques des matériaux. Di représente le diamètre de la particule dans le filtre (le matériau plus grossier) pour lequel il existe un pourcentage d'i % en poids de particules plus petites. De la même façon, d_i est le paramètre correspondant pour le matériau de base (le matériau plus fin à protéger).

En 1925, Terzaghi propose deux critères de dimensionnement des filtres :

$D15 > 4\ d15$	condition de perméabilité.
$D15 < 4\ d85$	condition de blocage.

Une formulation quasi-équivalente a celle de Terzaghi a été proposée par Sherard en 1963, en remplaçant le coefficient numérique 4 par 5. [10]

- ✓ Condition de perméabilité D15/d15> 5
- ✓ Condition de non entrainement des fines d85 > D15/5

Ces deux conditions se réunissent dans la formulation suivante :

$$5d85 > D15 > 5d15$$

Le plus souvent pour les petits barrages, on peut choisir un matériau drainant suffisamment perméable et satisfaisant directement a cette double condition: la mise en place d'un filtre est alors inutile.

En outre, pour s'assurer de la stabilité interne du matériau filtrant ou drainant, on devra vérifier la condition d'uniformité : 2<D60/D10<8 .

Parfois, on se voit contraint d'interposer, entre le remblai et le drain, de perméabilité et de granulométrie très différente une couche - filtre en prenant soin de vérifier les règles de filtre à chaque interface. [11]

Rapport-Gratuit.com

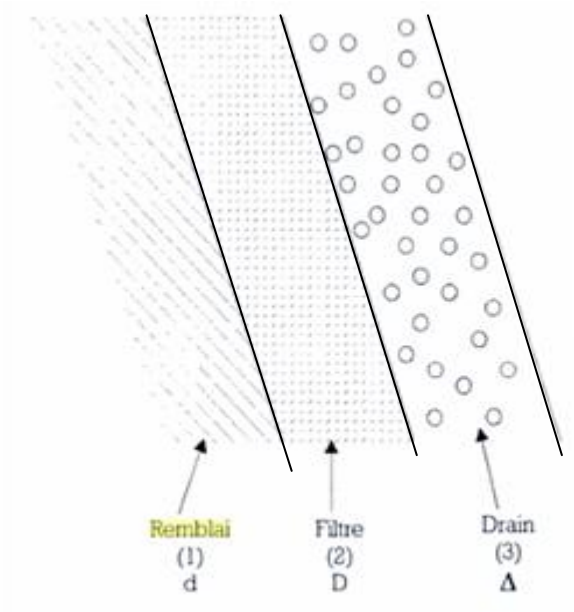

Fig.16 : Filtre répondant aux conditions de TERZAGHI visa vis des matériaux (1) à drainer et (3) drainant

$5d_{85} > D_{15} > 5d_{15}$

$5D_{85} > \Delta_{15} > 5D_{15}$

d : pour le remblai

D :pour le filtre

Δ : pour le drain

2.2.4 Epaisseur du filtre :

L'épaisseur du filtre ne doit pas être inférieure à 25 cm pour tenir compte des tassements qui se produisent dans tout le remblai. Cette épaisseur doit être toujours supérieure ou égale à 50 D_{15}.

Si la couche filtrante sert à drainer les eaux d'infiltration, sa capacité drainante doit être plus grande que le débit qui traverse le remblai et peut être vérifiée à l'aide de la loi de Darcy.[12]

2.3 Les drains :

2.3.1 Définition :

Le drain est un organe fortement perméable incorporé dans le barrage en terre. Il est généralement constitué de graviers et d'enrochements avec des caractéristiques de non altération au contact de l'eau et résistant aux grandes compressions. Il est admis que la

présence de drain dans les barrages en terre est indispensable pour leur stabilité. Parfois le drain classique est remplacé par des tuyaux poreux ou perforés en matière

On utilise également de plus en plus des géotextiles pour assurer le drainage des petits barrages. [4]

2.3.2 Rôle des drains :

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

- ✓ Intercepter les eaux d'infiltration et les évacuer à l'aval du barrage.
- ✓ Abaisser la ligne de saturation et éviter les résurgences sur le talus aval.
- ✓ Abaisser la ligne de saturation, pour garder une grande partie du remblai non saturé afin de conserver les caractéristiques géotechniques du matériau utilisé.
- ✓ La présence du drain dans un barrage en terre sert à minimiser le débit de fuite sur l'ouvrage.
- ✓ Il sert aussi à décompresser la fondation et donc à minimiser les pressions interstitielles.
- ✓ La présence du drain permet d'activer la consolidation du remblai.[12]

2.3.3 Différents types de drainages et leur dimensionnement :

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

i) Prisme de drainage :

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 rond 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 qualité acceptable. [12]

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

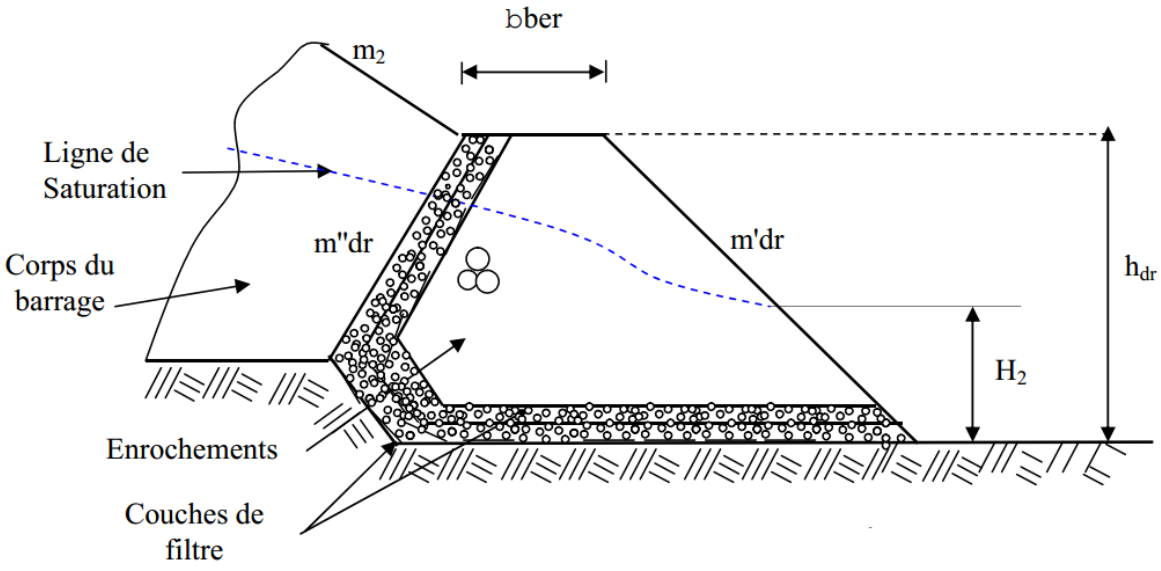

Fig.17 : Prisme de drainage aval

Dans la figure, les différentes dimensions sont illustrées à dessous :

b_{ber}: largeur de la berme

h_{dr}: hauteur du prisme de drainage

m'dr et m'' dr : pente des talus aval et amont du prisme de drainage

m_2: pente du talus aval du barrage. H_2: hateur d'eauà l'aval du barrge

ber≥3.00 mètres

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

$b_{ber} = 0.50$ à2.00 Métre

- ✓ La hauteur du prisme de drainage h_{dr} est fixée si le niveau d'eau à l'aval est

connu avec précision.

$h_{dr} = H_2 + (0.50$à 1.00métre).

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 :

$h_{dr} = (0.15$ à$0.18)H$

Avec.

H Hauteur totale du barrage

- ✓ la pente du talus aval :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:

$m'h_{dr} = (1.00 à 1.50).m_1$

$.m_1$: Pente amont du barrage.

- ✓ la pente du talus amont :elle 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 :

$m'_{dr} = (1.25 à 2.00).m_1$ m_1 : Pente amont du barrage.

ii) Drainage de surface :

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.

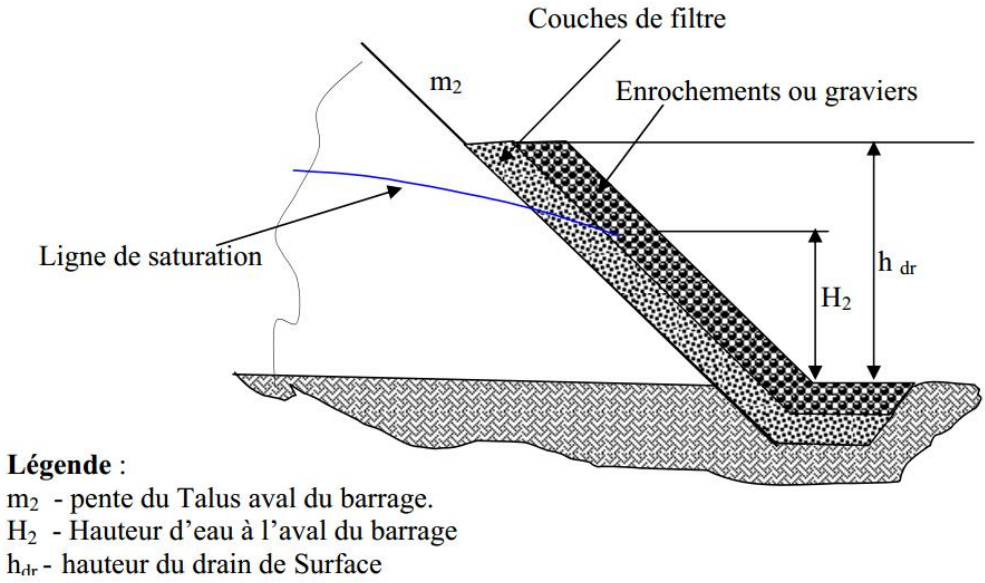

Fig.18 : drainage de surface

Le dimensionnement du drainage de surface se fait de la manière suivante :

- ✓ la hauteur (h_{dr}) du drainage de surface est souvent fixée en fonction de la hauteur d'eau à l'aval. Cette hauteur est choisie de la même manière que pour le prisme de drainage y compris lorsqu'il n'y a pas d'eau à l'aval.
- ✓ L'épaisseur du drainage de surface est dimensionnée pour évacuer le débit d'infiltration sans débordement et il doit être vérifié pour ne pas être altéré par l'action des vagues. [11]

iii) Le drain tapis interne :

Le dimensionnement du tapis drainant est très simple et se résume en une épaisseur moyenne de sable de 0,5 m (valeurs extrêmes 0,3 m à 0,8 m) et en une surface drain comprise entre 1/3 et les 2/3 de la projection du talus aval sur l'horizontale. [11]

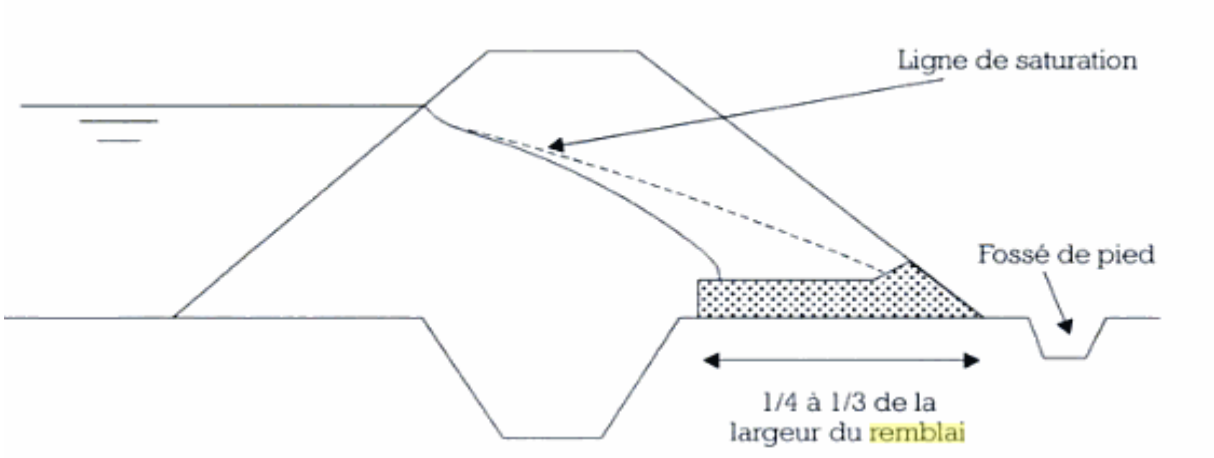

Fig.19 : Tapis drainant pour barrages en terre

Le respect des conditions de filtre du matériau drainant visa vis du remblai, mais aussi vis à vis du sol de la fondation si celui-ci s'avère peu perméable, doit être examiné avec soin. On adaptera la granulométrie du drain en conséquence et, si nécessaire, on interposera un filtre granulaire ou géotextile. [11]

iv) Prisme de drainage avec drain tapis interne :

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 elles fondations sont perméable ou non.

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

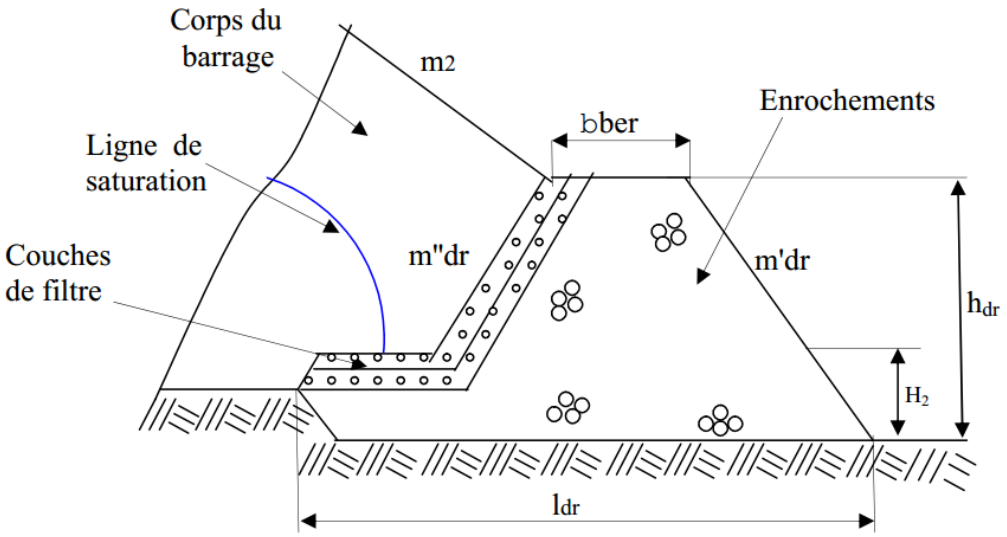

Fig.20 : Prisme de drainage avec drain tapis interne sur fondations imperméables

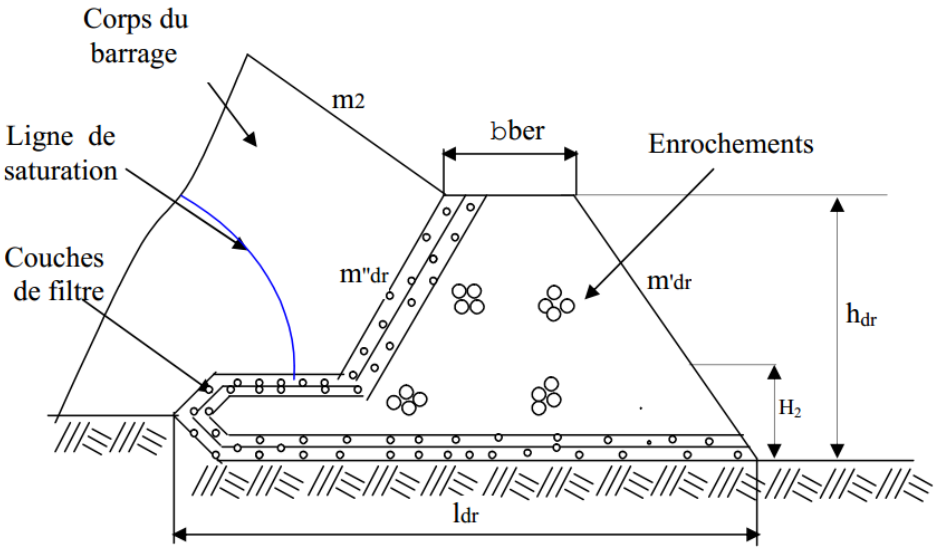

Fig.21: Prisme de drainage avec drain tapis interne sur fondations perméables

v) Drainage a bande :

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.

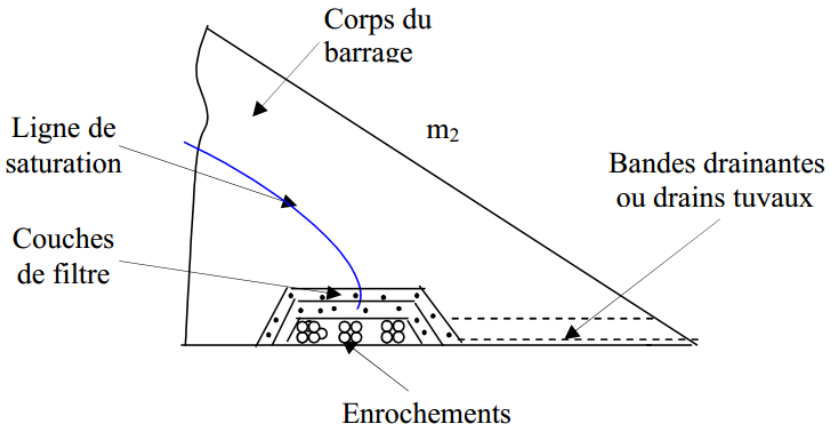

Fig.22 : Drainage à bande des barrages

Le dimensionnement de ce type de drainage se fait de la même façon que pour un drain tapis interne. [13]

vi)Drain vertical :

Le dimensionnement du drain cheminé, qui représente à lui seul 79 % des systèmes drainants, est beaucoup plus complexe. [11]

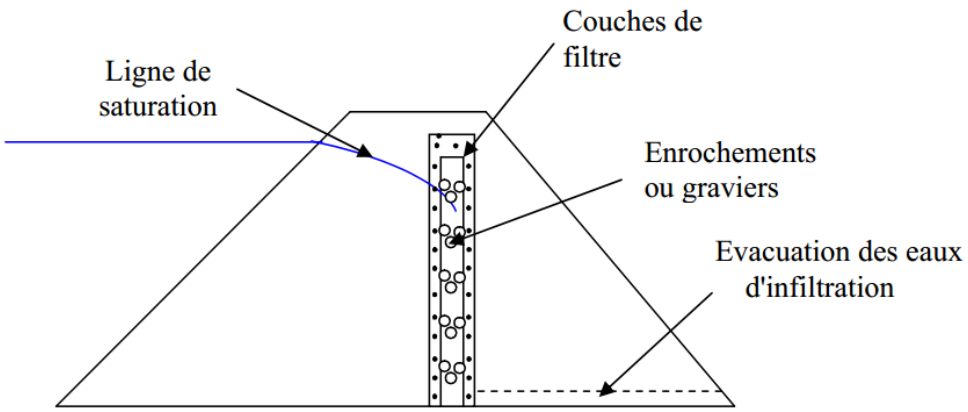

Fig.23 : Derain vertical pour barrage en terre

Le drain vertical - ou drain cheminée - est une alternative intéressante au tapis drainant puisqu'elle permet d'éviter le dysfonctionnement potentiel du drainage consécutif à l'anisotropie de perméabilité mentionnée.

L'épaisseur à retenir pour un tel drain est de l'ordre de 0,60 m et ('implantation idéale se situe, un peu en aval de l'axe du remblai (afin de bénéficier au maximum de l'effet d'étanchéité.

Le sommet du drain est arasé au niveau normal du plan d'eau (NNE), il n'est pas nécessaire de le prolonger jusqu'au niveau des plus hautes eaux (PHE) qui est atteint à priori de façon trop temporaire pour affecter significativement l'état de saturation du remblai. Sa cote de base est calée de façon permettre l'évacuation gravitaire des eaux jusqu'en pied aval de digue. La pose, en fond de cheminée, d'un collecteur drainant facilite l'écoulement des eaux. Les exutoires peuvent être constitues de collecteurs PVC étanches débouchant dans le fossé de pied et espaces tous les 30 a 50 m dans le sens de la longueur du remblai. [12]

Les drains peuvent être équipés de collecteurs qui sont des tuyaux drainants en plastique (PVC ou PEHD), souples ou rigides. Ces collecteurs drainants existent en deux types : circulaire doté de fentes sur l'ensemble du pourtour («drain agricole.) ou avec fentes seulement sur les 2/3 supérieurs («drain routier »).

CHAP3

LES INFILTRATIONS DANS LES BARRAGES EN TERRE

3.1 Introduction :

Les infiltrations dans les barrages en terre doivent être abordées sous trois angles différents où on devait aboutir à :

- ✓ La détermination de la ligne de saturation ;
- ✓ La détermination des pressions interstitielles ;
- ✓ Le calcul du débit de fuite ;

3.2 Equation de la ligne de saturation

On parle d'une ligne de saturation dans une coupe transversale car dans la réalité c'est une surface suivant laquelle la pression est égale à la pression atmosphérique.

La méthode pour le tracé de cette ligne a été proposée par Kozeny qui a montré que pour un barrage en terre homogène, la ligne de saturation est assimilable à une parabole dans sa partie médiane.

L'équation de la ligne de saturation s'écrit de la manière suivante :

y^2 -y_0^2 -2xy_0=0

Avec

y_0=$\sqrt{H_1^2 + L^2}$ -L . [14]

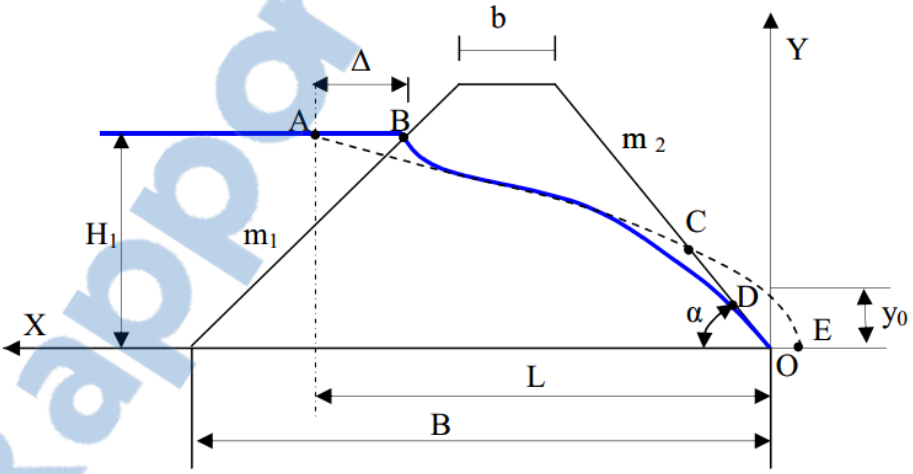

Fig.24 : Ligne de saturation dans barrage en terre non drainé d'après kozeny

Rapport-Gratuit.com

3.2.1 Distance entre les deux points d'intersection du plan d'eau avec la parabole théorique et le talus amont :

En traçant la parabole de Kozeny celle-ci coupe le plan d'eau à une distance qui ne coïncide pas avec le passage réel. Elle doit être corrigée par une courbe normale au talus amont et tangente à la parabole théorique à l'aval. Pour calculer la distance séparant les deux Points nous disposons de deux méthodes :

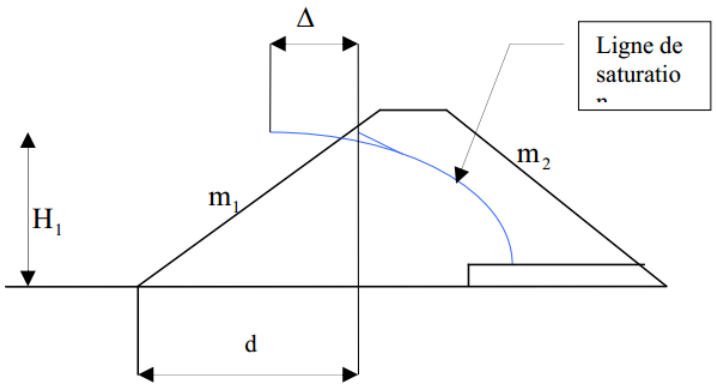

Fig.25 : Détermination de la grandeur Δ pour la correction de la ligne de saturation à l'amont

3.2.1.1 Méthode de Casagrande.

D'après Casagrande, la parabole théorique coupe le plan d'eau amont en un point situé à une distance horizontale du parement amont égale à 0,3 de la projection horizontale de la partie mouillée du même parement.

L'équation de la ligne de saturation est une parabole théorique partant d'un point situé sur la surface libre de la retenue est à une distance égale à 0,3 de la projection horizontale de la partie mouillée du talus amont.

En pratique le tracé serait corrigé au voisinage du parement amont en considérant ce dernier comme équipotentielle et donc la ligne de saturation doit lui être perpendiculaire et rejoint la parabole théorique en lui étant tangente.

Soit.

$\Delta = 0.3 * d$

Qui peut s'écrit

$\Delta = 0.3 * m_1 * H_1$

Δ: Distance entre les deux points d'intersection du plan d'eau avec la parabole théorique et le talus amont

m_1 :, *Pente du talus amont*

H_1 : Charge à l'amont. [15]

3.2.1.2 -Méthode du changement du talus amont.

Cette méthode a été proposée par un groupe de professeur de l'ex U.R.S.S., elle consiste à procéder pour les besoins de calcul au changement du talus amont en parement vertical et en gardant la même valeur des pertes de charge lors du passage de l'eau dans les deux cas.[16]

$$\Delta = \lambda.H_1 = \frac{m_1}{2m_1 + 1}.H_1$$

Avec.

Δ : Distance entre les deux points d'intersection du plan d'eau avec la parabole théorique et le talus amont

m_1 : pente du talus amont.

H_1 : Charge à l'amont

3.2.2 Détermination du point d'intersection de la ligne de saturation avec le talus aval :

La ligne de saturation coupe le parement aval en un point qui ne coïncide pas avec le point de passage de la parabole théorique de Kozeny. Généralement la ligne de saturation passe à deux tiers de la distance séparant le point de passage de la parabole théorique en partant du pied aval du barrage [4].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

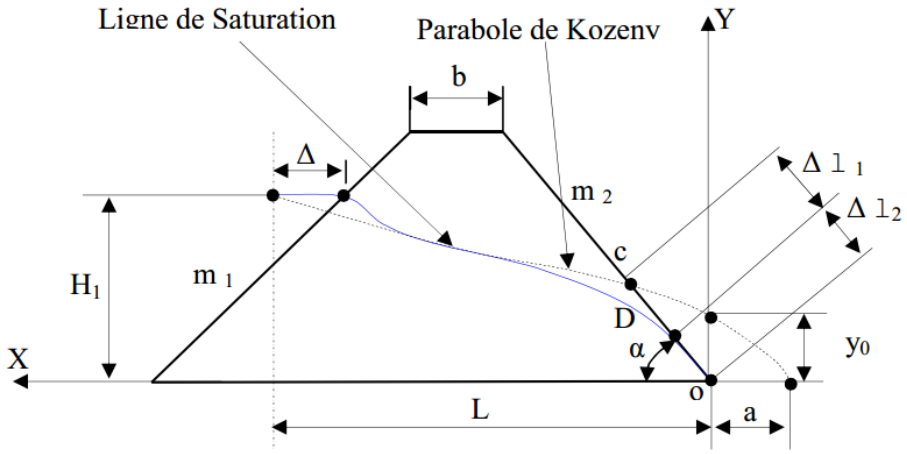

Fig.26 : Correction de la ligne de saturation avec le parement aval

En pratique on peut utiliser deux méthodes.

Méthode 1

Conformément aux indications de la figure .25

$$\Delta l_2 = \frac{2}{3}(\Delta l_1 + \Delta l_2)$$

Et

$$\frac{\Delta l_1}{\Delta l_2} = \frac{3}{8}\cos\frac{\alpha}{2}$$

Méthode 2

Cette méthode est celle de Casagrande où il a démontré que Δl_2 ne dépend que de la distance focale de la parabole de base de Kozeny et de l'angle du talus aval du barrage ce qui lui a permis de dresser une courbe de variation.

La figure 26 donne les valeurs de paramètre a en fonction de l'angle α

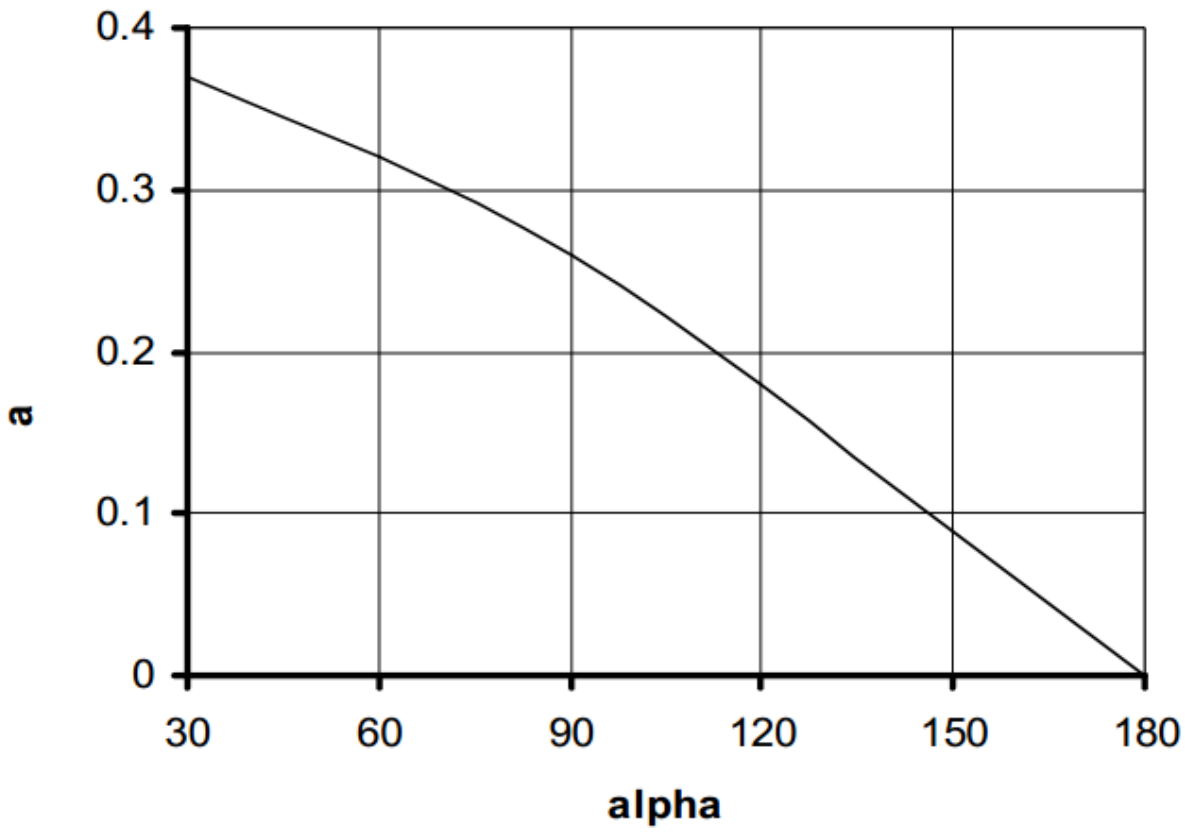

Fig.27 : Courbe de cassgrande pour la détermination du paramètre alpha

a) Correction de la ligne de saturation à l'aval :

$$a=\frac{\Delta l_1}{\Delta l_1+\Delta l_2}$$

les expressions de Δl_2 *sont énuméras sur le tableau* N°2:

Tableau $N^e = 02$*: les expressions de* Δl_2 *en fonction de* α

Angle α	Expressions de Δl_2
$\alpha < 30^0$	$\Delta l_2 = \sqrt{H_1^2 + L^2}$ - $\sqrt{L^2 - H_1^2 * \cot\alpha}$
$30^0 \leq \alpha \leq 180^0$	$\Delta l_2 = y_0 * \frac{a}{1-\cos\alpha}$

On signale que pour les barrages dotés de drainage, la ligne de saturation est rabattue pour passer dans le drain [17].

3.2.3 Méthode de l'analogique électro- hydrodynamique :

Beaucoup de phénomènes hydrauliques sont clarifiés par l'utilisation de l'analogie électrique. D'une façon générale les lois régissant le passage d'un courant électrique dans un conducteur sont analogues aux lois de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux.

Ainsi entre les grandeurs physiques caractérisant les deux phénomènes électrique et hydraulique on peut trouver les correspondances tel que:

- ✓ tension électrique = charge hydraulique.
- ✓ densité du courant = vitesse de filtration.
- ✓ conductibilité électrique = perméabilité.
- ✓ intensité de courant = débit.

La technique la plus ancienne est celle de la cuve rheoelectrique où le conducteur n'est autre que de l'eau placée dans une cuve à parois isolante et de forme adoptée au problème à résoudre. Cette technique est pratiquement abandonnée au profil de celle du papier conducteur.

Dans cette dernière on utilise un papier spécial appelé « Télédéltos » sur lequel on découpe le modèle correspondant à l'ouvrage et on y place des électrodes qui sont représentées par de la peinture à base d'argent. [16]

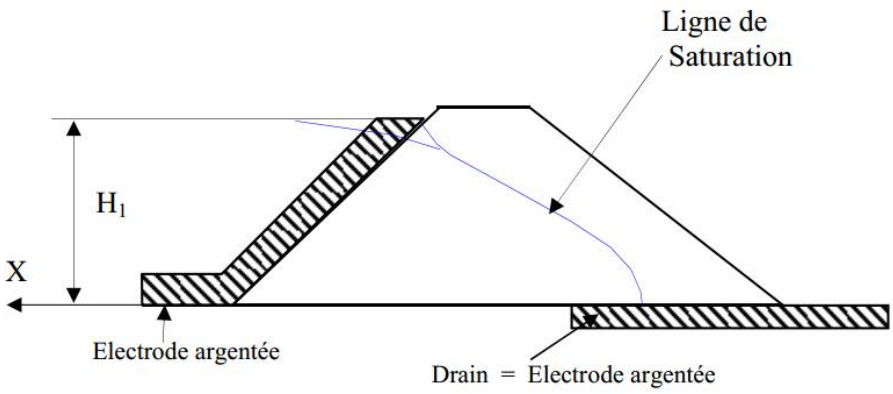

Fig.28 : Profil servant à l'étude des infiltrations par analogie électrique

3.3 Détermination des pressions interstitielles :

3.3.1 Introduction :

Dans un sol homogène et isotrope soumis à un écoulement d'eau permanent et sans variation de volume du sol (l'arrangement du squelette du solide ne se modifie pas), les deux équations qui régissent l'écoulement sont :

- La condition de continuité de la phase liquide.

$$\mathrm{div}\vec{V} = 0$$

-La loi de Darcy.

$$\vec{V} = -k\overrightarrow{grad}.h$$

De ces deux équations nous pourrons avoir le système suivant :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V_x}{\partial x} + \dfrac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \\ V_x = -k.\dfrac{\partial h}{\partial x} \\ V_z = -k.\dfrac{\partial h}{\partial z} \end{cases}$$

La condition de continuité s'écrit alors :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \Delta h = 0$$

En général l'écoulement a lieu entre des limites où sont imposées des conditions d'écoulement ou de charge hydraulique. Habituellement on a à définir une fonction qui satisfait à l'équation de Laplace avec ses conditions aux limites. [16]

En pratiques, comme les écoulements dans les barrages en terre, la résolution de l'équation de Laplace consiste à rechercher:

- ✓ Les lignes équipotentielles

- ✓ les lignes de courant.

En général l'équation de Laplace n'est pas intégrable et on a recours aux méthodes suivantes pour la détermination des réseaux d'écoulement :

- ✓ Recherche de solution analytique à partir du potentiel complexe dans les cas géométriquement simples.
- ✓ Méthodes numériques.
- ✓ Méthodes analogiques

- ✓ manuellement par approximations successives.

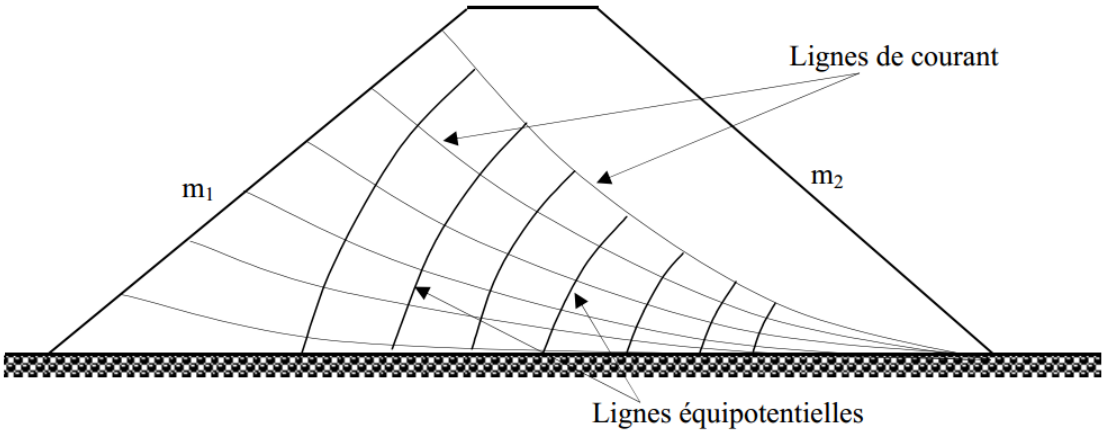

Fig.29 : Tracer des ligne des courant et des ligne équipotentielles

3.3.2Utilisation des réseaux d'écoulement :

Dans la construction des barrages en terre, les réseaux d'écoulement nous permettent de résoudre deux problèmes essentiels :

- ✓ le calcul du débit d'infiltration.
- ✓ le calcul de la pression interstitielle.

Les lignes de courants et les lignes équipotentielles forment un réseau orthogonal où deux lignes de courants forment un tube de courant dans lequel le débit reste constant. Le calcul du débit est fait pour chaque tube de courant et la somme des débits donnent le débit total circulant à l'intérieur de ces limites géométriques.

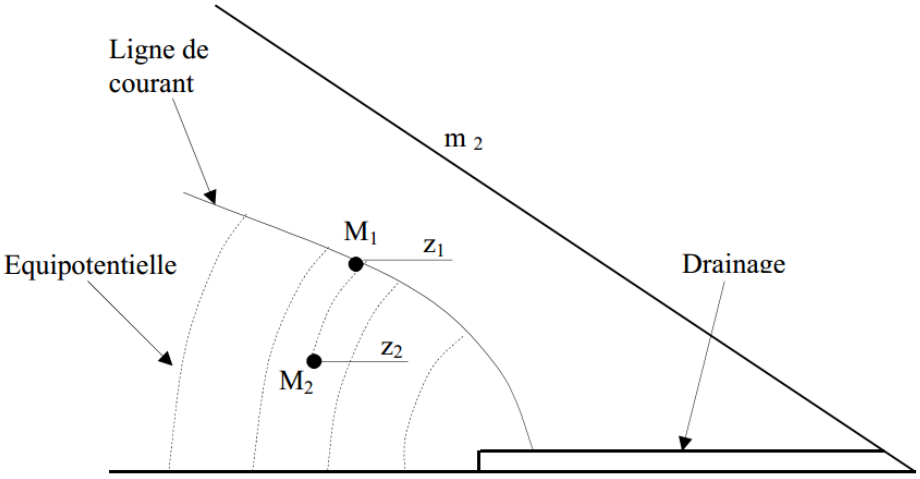

Fig.30 : Détermination de la pression interstitielle

La détermination de la pression interstitielle se fait d'après la figure ci-dessus suivant l'expression suivante :

$u_{m2} = (z1 - z2) * \gamma_w$

3.4 Influences de la ligne de saturation sur le comportement du barrage :

3.4.1 Stabilité hydraulique :

i) Le renard :

Le renard hydraulique apparaît dans un ouvrage de génie civil lorsque l'écoulement d'eau à travers celui-ci se fait selon un chemin préférentiel. Le long de ce chemin se trouvent des points faibles affectés par des phénomènes d'érosion (érosion régressive ou boulance). Si ces points faibles ne sont pas entourés par des zones stables limitant leur expansion, il y a alors formation d'un trou continu de l'aval vers l'amont, La vitesse d'écoulement à travers l'ouvrage augmente et accélère ainsi le processus de ruine en cours .

ii) La suffusion :

La suffusion est un phénomène de migration des petites particules à travers le

squelette constitutif d'un sol (Skempton et Brogan, 1994). Il en résulte une

redistribution des fines dans le sol qui s'apparente à une migration massive desparticules fines.

- La suffusion peut être un élément déclencheur de l'érosion régressive à l'aval del'ouvrage, la migration des fines permettant à l'eau de s'écouler plus rapidement. Le phénomène d'érosion régressive peut ensuite remonter jusqu'à l'amont, et favoriser la création d'un renard.

- L'entraînement des matériaux peut également se faire en tête de remblai, créant ainsi un affaissement de la crête et pouvant aboutir en période de crue à l'immersion du remblai.

- Enfin, la migration des particules fines accroît le risque de colmatage et en conséquence, les pressions interstitielles peuvent augmenter en un point localisé du remblai. Si ce point est à l'aval, il va se former une zone instable qui menacera l'ouvrage de ruine.

iii) l'érosion interne :

L'érosion interne est la première source d'incidents sur les ouvrages hydrauliques en terre . L'érosion interne est définie comme l'entraînement vers l'aval des particules constitutives du remblai, ou de la fondation, sous l'action d'un écoulement provenant de la retenue, pour les barrages, ou des écoulements liés à la crue pour les digues .
Pour que l'érosion interne se développe, deux phénomènes doivent avoir Lieu simultanément: l'arrachement de particules, et le transport de ces particules. Ces différents modes de déclenchement de l'érosion interne peuvent se combiner entre eux et être difficilement distinguables. Pour entraîner la rupture, il faut aussi que les conditions du transport des particules soient assurées afin que l'érosion soit entretenue. La nature du transport conduit à distinguer deux mécanismes d'érosion interne: le renard hydraulique et la suffusion.
Les vitesses de l'écoulement sont fortes dans le mécanisme de renard hydraulique et peu êtres élevées dans le mécanisme de suffusion. Le mécanisme de renard est le plus dangereux et le plus rapide: c'est celui qui entraîne le plus souvent la rupture des digues.
Des facteurs tels que l'absence de filtre aval, la présence de terriers d'animaux,
la présence de conduite traversante ou de racines d'arbres favorise le développement d'un mécanisme de rupture par renard sur les digues.[18]

3.4.2 Stabilité mécanique :

Au plan microscopique et très schématiquement, la résistance d'un sol au sens large réside, dans la reprise des efforts extérieurs par le frottement grain à grain des particules solides qui le constituent, et par la cohésion entre particules dans le cas de matériaux fins.

Or, la pression interstitielle - c'est-à-dire la pression de l'eau présente entre les grains - diminue, voire annule, le frottement. Aussi, les sots satures résistent beaucoup moins bien aux contraintes de cisaillement qui tendent à les faire glisser suivant des surfaces de rupture privilégiées.

On conçoit, des lors, aisément que la configuration de la ligne de saturation dans le remblai influence grandement le comportement de l'ouvrage a la stabilité, comme l'illustre le schéma comparatif suivant.[10]

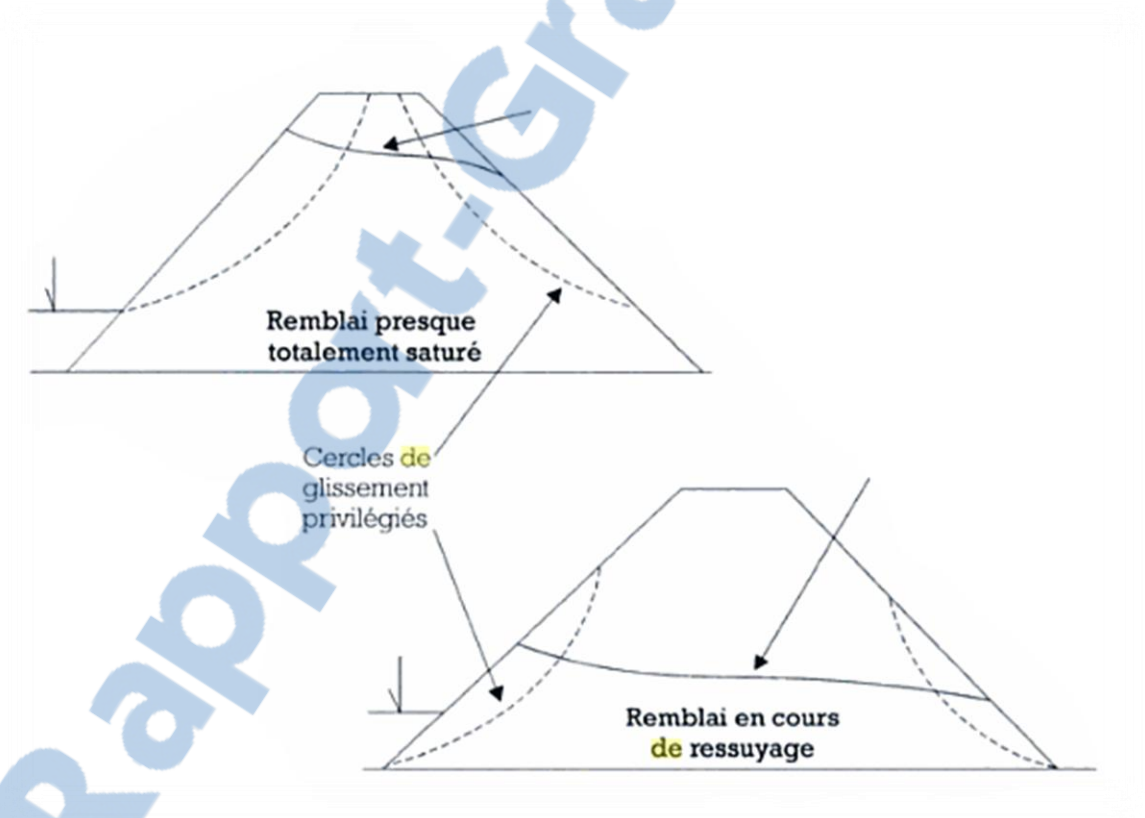

Fig.31 : variation de la sensibilité au glissement selon position de la ligne de saturations

Rapport-Gratuit.com

3.5 Gradient hydraulique et vitesse critique de percolation :

Ces deux notions sont fondamentales dans le processus d'érosion interne. Elles interviennent a tous les stades d'arrachement des grains ou de transport.

le gradient hydraulique est représente par :

$i= H/L$

Avec : H charge hydrostatique

L : longueur de percolation

La vitesse de percolation est représentée par:

$V=k*i$

Avec : k coefficient de perméabilité du sol i gradient hydraulique

Lorsqu'il y a un arrachement de particules dans le sol, la vitesse de percolation est nécessairement une vitesse antique pour le milieu traverse par l'écoulement. Elle peut être atteinte par une augmentation de k ou une augmentation de i

On admettra aisément qu'il est difficile de connaitre dans le détail les variations de la perméabilité au sein d'un remblai ou d'une fondation, comme il est difficile d'estimer les pertes de charges le long des filets liquides autrement que d'une manière globale entre l'amont du barrage et un exutoire connu (drain, recharge, pied aval, puits, etc...).

Le gradient hydraulique global est, finalement, le soul paramètre aisément quantifiable. C'est aussi un paramètre modulable. Si on admet que H est une valeur définie au projet (hauteur d'eau), la valeur dei dépend de L c'est-à-dire de la longueur de percolation sur laquelle on peut agir. C'est ce que l'on fait en s'appuyant sur la règle empirique de Lane pour se préserver d'un phénomène d'érosion interne en fondation.

Lane a démontre, par l'étude du comportement de 280 barrages en béton sur des alluvions diverses, existait une longueur critique de percolation en fonction de la nature des sols, donnée par la relation suivante

$C=(\sum L_v+1/3L_h)/H$

avec : $\sum L_V$ somme des distances verticales

distance horizontale parcourue par l'eau sous l'ouvrage (le coefficient 1/3 tient compte du fait que la perméabilité horizontale est supérieure a la perméabilité vertical dans les sol alluvionnaires).

H : charge hydrostatique totale

C : coefficient dépendant de la nature du sot .

Tableau3 : la valeur de coefficient(c) en fonction la nature du sol

Nature du sot	C (valeur mimal)
Sable très fin ou silt	8,5
Sable fin	7
Sable moyen	6
Sable grossier	5
Gravier fin	4
Gravier moyen	3,5
Gravier grossier et pierres	3
Galets, pierres et graviers	2,5
Argile	2
Argiles raides	1,8

l'application de cette relation, bien qu'elle ne soit pas exactement extrapolable a la fondation d'un barrage en terre déformable, donne un ordre de grandeur de la longueur de percolation susceptible de protéger la fondation d'un barrage du phénomène d'érosion interne et on l'applique couramment.

Ceci revient à définir un gradient hydraulique critique :

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

$i_c = 1 / C$

en fonction de la nature des sols et a le respecter.

Dans la pratique, chaque fois que le gradient calculé entre l'origine d'un écoulement et un exutoire concernés par l'écoulement , on modifiera la structure du barrage en allongeant les percolations autant que faire ce peut, ou bien on bloquera par des filtres toute possibilité d'entrainement des fines par l'élément liquide ,ou bien encore on s'opposera à toute percolation par la mise en place d'écrans pour protéger l'ouvrage, ou une partie de l'ouvrage de l'érosion interne.

Les mêmes précautions devront être prises pour un grand ou un petit barrage .Il ne faut pas croire, en effet, qu'un petit barrage soumis à une faible charge est moins vulnérable qu'un grand sur ce point.. Les gradients hydrauliques sont du mémé ordre de grandeur dans les deux cas et les précautions techniques doivent être mêmes.

Si l'ouvrage est conforme aux règle de l'art en matière de choix technique et s'il est bien réalisé, le phénomène d'érosion interne ne peut plus se produire qu'accidentellement. [11]

3.6 Conclusion :

Cet aperçu su ceint comtiste eu une synthèse sur les différentes méthodes relatives aux études des écoulements dans le barrage en terre.

En se basant sur la modélisation, la partie suivante du travail consiste à étudier les infiltrations dans le corps du barrage de Sikkak pour deux variantes de conception du noyon (central vertical et incliné) cette étude permettra de dresser un bilan de comparaison lié l'évaluation des différents paramètres en relation avec les écoulements dans l'organe d'étanchéité.

CHAP4

ETUDE COMPARATIVE SURLESVARIANTES DE CO NCEPTION DES NOYAUX DES BARRAGES

4.1Présentation du barrage, objet de l'etude

Le barrage d'Aïn Yousef est situé sur l'oued de SIKKAK, à la hauteur de «Gaadet Boukaden », à environ de 1 km du village d'Aïn Youcef et à 20 km au nord de la ville Tlemcen. Le site de barrage est accessible à partir des chemins de wilaya CW38 et CW 71 (Figure 31). Le bassin versant de l'Oued SIKKAK, à la hauteur du barrage, occupe une superficie de 326 Km^2. Sa partie supérieure, d'une superficie de 85 km^2, est exploitée par le barrage de Meffrouche, le bassin net en correspondance du site du barrage d'Aïn Youcef est de 241km^2 (Rouissat. N, 2007).

Le barrage de SIKKAK est destiné à satisfaire les besoins en eau pour l'irrigation de la plaine de Henneya et la vallée de l'Oued SIKKAK. Le volume que régularise annuellement le barrage est de 22Hm^3.

Lors de l'exploitation du barrage, et en fonction des besoins croissants du groupement urbain de Tlemcen en Alimentation en eau potable, un transfert a été réalisé pour un volume annuel de 7 millions de m^3.

Le corps de barrage est zoné, à noyau centrale de hauteur 52m.
Le noyau d'argile possède un ne base de 25m avec une hauteur de 51m.
Les recharges sont projetées en grés issus des excavations sur site.
Le barrage est pourvu de système filtres concassage (sable et gravier) et de géotextiles

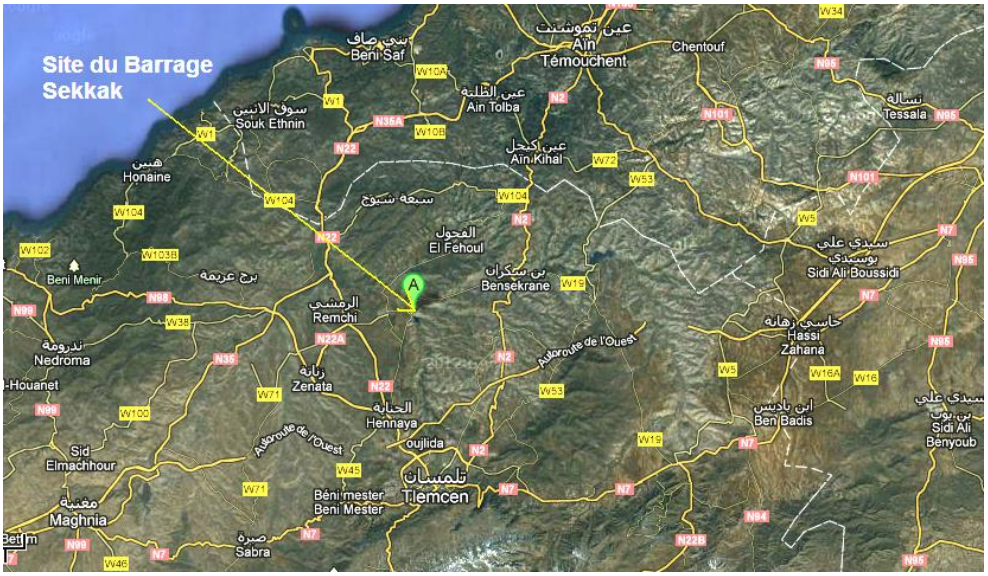

Figure 31 : Vue par satellite de la situation du barrage SIKKAK (Google Map)

4.2 Géologie et géotechnique :

Le site de barrage et la cuvette se trouve dans le bassin sédimentaire de la moyenne de Tafna. Ce bassin est constitué de dépôt de Miocène inférieur et du domaine atlastique. Sa partie supérieure se termine par une couche d'alluvions plio-quaternaires, cachée par des encroûtements carbonatés plus récents.

Le bassin de la moyenne Tafna, en ce qui concerne le plateau de Hennaya, est colmaté par des terrains gréso-pélitique de faciès littoral et de mer peu profonde. Il a ressenti des phases terminales de la tectogenése compressive atlastique attestée par une structure à plis amples.

Les sols de surface constitués d'alluvions et de colluvions argileuses confèrent à la cuvette du barrage une bonne capacité de rétention d'eau. Les affleurements de grés dans le voisinage immédiat des ouvrages peuvent constituer des chemins préférentiels de percolation.

Le site du barrage se caractérise par la présence de quatre unités ou faciès de roches sédimentaires. Les excavations réalisées aux emplacements de l'évacuateur de crues et de galerie de dérivation, ainsi que les forages exécutés lors des travaux de reconnaissance, des plots d'essai pour les injections et du rideau d'injections ont permis de préciser certains aspects de cette stratigraphie. Les formations rencontrées sont les suivantes :

Série pélito- gréseuse supérieure : Elle a une épaisseur qui varie de 0 à 25 m.

Les grés : le grés est la roche la plus résistante rencontrée sur le site. Il se présente sous la forme de bancs dont l'épaisseur moyenne est de 28 à 30 m environ.

La pélite bleu : Il s'agit d'une couche d'épaisseur variant entre 6 et 7 m constituée de pélite et de pélite marneuses d'une couleur bleu sombre.

Série pélito- gréseuse inférieure *:* Cette formation se retrouve en dessous de la couche de pélite bleue .Il s'agit d'une succession de couche de pélite plus ou moins marneuse et de couche de grés. L'épaisseur des couches de pélites varie de quelques centimètres à 0.4 m

4.3 Objectifs recherchés à travers la modélisation :

Les barrages à noyau, zonés sont adoptés en cas d'insuffisance, en quantité, de matériaux étanches pour ériger la totalité du remblai du barrage.

Les noyaux sont conçus selon quartes critères fondamentaux à savoir :

- ✓ Disposition par rapport à la verticale.
- ✓ Position avancée vers la recharge amont.
- ✓ Base inferieure à fixer en fonction de l'effet contact et aux critères d'érosion mécanique.
- ✓ Perméabilité de la recharge amont

Les noyaux, organes principaux d'étanchéité, centraux offrent l'avantage de leur facilité de réalisation par rapport à ceux avancés. La position du noyau vis-à-vis de recharges engendre des influence sur :

- ✓ Position et allure de la ligne de saturation
- ✓ Contraintes appliquées sur le noyau par les recharges
- ✓ Dissipation de la charge depuis le parement amont du barrage jusqu'au parement amont du noyau
- ✓ Valeurs des paramètres liés à l'érosion mécanique
- ✓ Cout relatif au remblai du noyau.

Par rapport à tous ces aspects une analyse paramétrée a été menée par le biais de la modélisation du corps du barrage .Le code de calcul utilisé est le logiciel SEEP/W2007.

4.4Présentation du code de calcul SEEP/W 2007

4.4.1Fonction

SEEP/W est un logiciel commercialisé par Geo-slope International utilisé pour la modélisation par éléments finis des écoulements de fluides et les pressions interstitielles dans les milieux poreux (sols, bétons, roche, etc.).

SEEP/W peut titre utilisé pour des projets de géotechnique, municipaux, hydrogéologiques, miniers, etc. On s'en sert pour, par exemple, modéliser les écoulements à travers les barrages, dans les routes, à travers les sites d'enfouissement, autour des rivières, etc.

La figure N^{e}32 illustre toutes les fonctions du menu du logiciel.

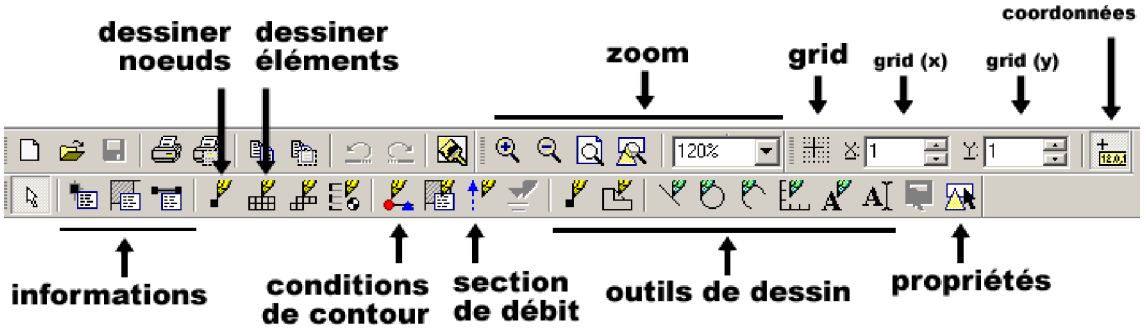

Fig32 : Schéma de la barre menu code de calcul SEEP

La figure N^{e} = 33 donne les délaits relatifs à la définition des nœuds et éléments du massif à discrétiser.

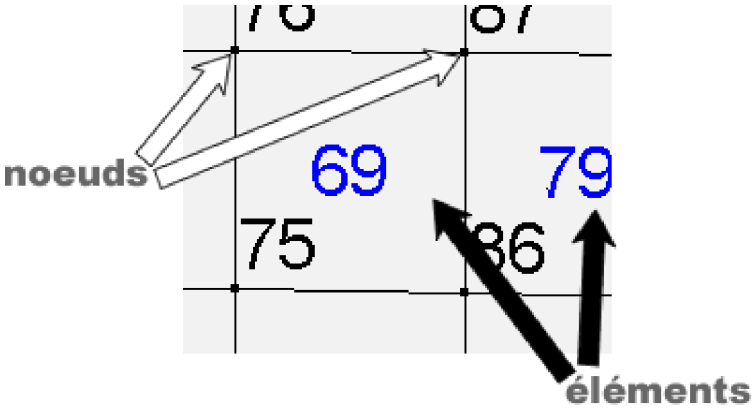

Fig33 : Définition des nœuds et éléments code de calcul SEEP/W 2007

La figure N^{e} = 34 détaille la mise en place du massif à discrétiser en coordonnées planes.

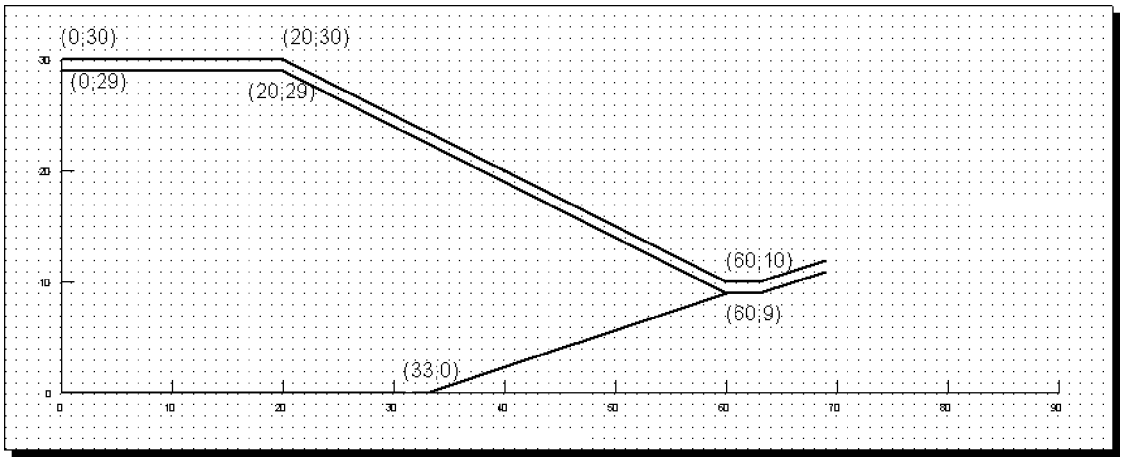

Fig34 : Schématisation du massif code de calcul SEEP/W2007

4.4.2 Maillage

Un maillage est fait d'éléments attachés par des nœuds (figure 33).

La chronologie des fonctions à suivre est résumée en ce qui suit

- ✓ Materials : choisissez le matériau dont est constituée la région.
- ✓ Mesh : vous avez le choix entre :
- ✓ No mesh : la région est un seul élément.
- ✓ Unstructured : la région se divise en multiples triangles.
- ✓ Structured : la région se divise en multiples quadrilatères.

La figure $N^e = 35$ donne la schématisation du maillage

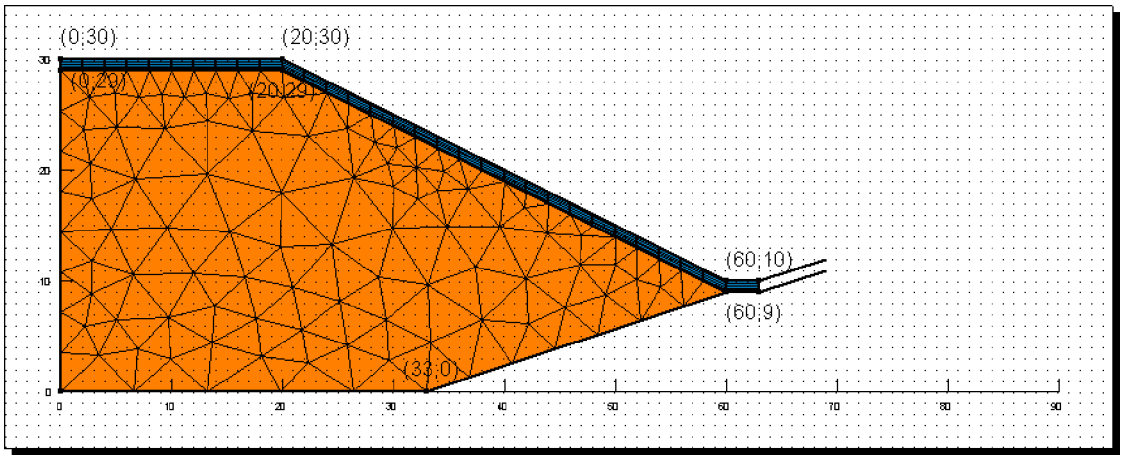

Fig. 35 : Schématisation du maillage code calcul SEEP/W 2007

4.4.3 La schématisation du maillage suit les étapes suivantes

- ✓ Opening : permet de modélisé des conduites (trous ronds dans le maillage).
- ✓ Edges : choisir le nombre d'élément de chaque bordure (procédure semi-automatique : vous choisissez le nombre d'éléments d'une bordure et les autres bordures s'ajustent).
- ✓ Elements : propriétés des éléments, permet de changer l'ordre d'intégration et l'épaisseur des éléments (pour les simulations 3D).
- ✓ Openings : propriétés des trous.

Plus votre maillage est fin, plus le calcul sera long. Un maillage fin est nécessaire dans les zones où l'on envisage de forts changements de pression. Pour les matériaux à fonctions abruptes (sols grossiers), les changements de pression peuvent être drastiques. De plus, les matériaux grossiers, étant donné leurs fonctions abruptes, un petit changement de pression peut entraîner un grand changement de teneur en eau ou de conductivité hydraulique. Pensez à raffiner le maillage pour les sables et les graviers.

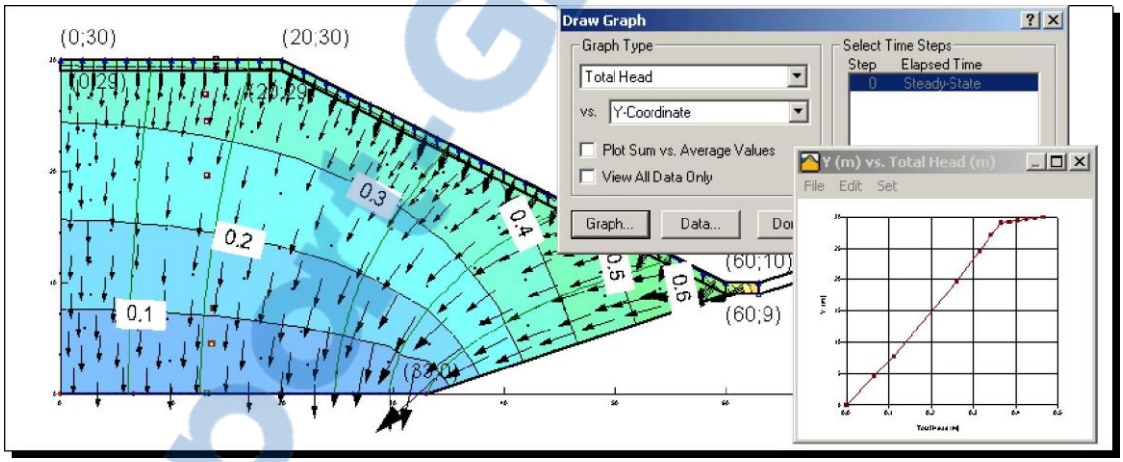

Fig.36 : Resultat graphique d'un exemple de modilisation_code de calcul SEEP/W2007

4.5 Etude des cas de la modélisation

Dans l'objectif d'analyser l'influence de la position du noyau de sa configuration par rapport aux recharges du barrage sur les paramétres liés aux écoulements, plusieurs cas de modélisation ont été considérés en l'accurence :

- ✓ Noyau central avec variation de la perméabilité des recharges
- ✓ Noyau avancé, incliné dont l'axe se situe à 50m par rapport à l'axe de la crête
- ✓ Noyau avancé, incliné dont l'axe se situe à 75m par rapport à l'axe de la crête

Pour les cas des noyau avancée inclinés ,il a été également considèrent les variation de la perméabilité des recharges.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les différents cas de la modélisation se résument en ce qui suit :

Cas1 : barrage à noyau central vertical avec recharges plus ou moins imperméables

Cas2 : barrage à noyau avancé à 50m par rapport de l'axe de la crête du barrage incliné avec recharges du ou moins imperméables

Cas3 : barrage à noyau avancé à 75m par rapport de l'axe de la crête du barrage incliné avec recharges du plus ou moins imperméables

Cas4 : barrage à noyau central vertical avec recharges plus ou moins perméables

Cas5 : barrage à noyau avancé à 50m par rapport de l'axe de la crête du barrage incliné avec recharges du ou moins perméables

Cas6 : barrage à noyau avancé à 75m par rapport de l'axe de la crête du barrage incliné avec recharges du plus ou moins perméables

Les figures 37 à 42 illustrent les profils géométriques du barrage ayant servis à la modélisation pour différent cas de position de configuration du noyau et de perméabilité des recharges .Les tableau 4 à 9 donnent la nature des matériaux composant le corps du barrage ainsi leur perméabilités correspondantes.

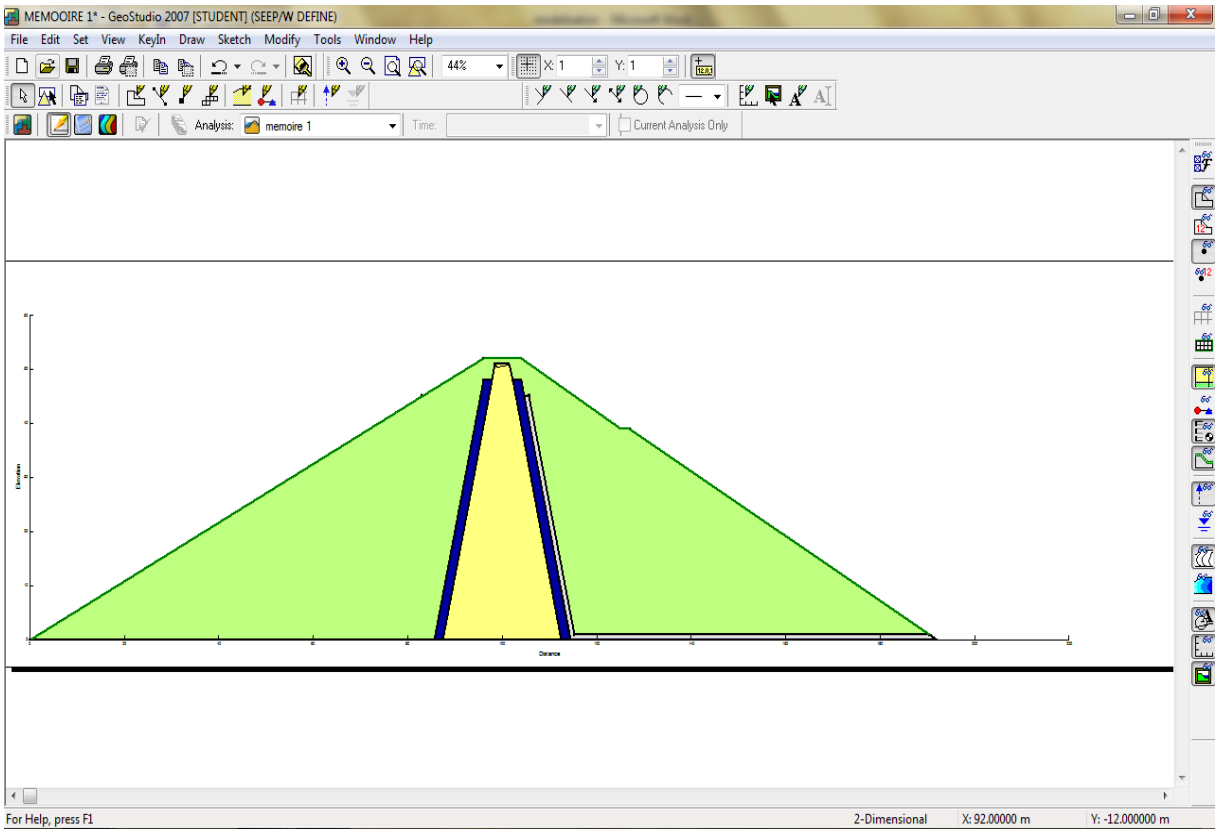

Fig.37 : Profil servant à la modélisation cas N°1

Tableau 4 : Nature des matériaux avec valeur des perméabilités casN°1

Matériaux	Noyau	Filtre	Drain	Recharge
Perméabilité K (m/s)	$10^{-8}<k<10^{-10}$	$10^{-1}<k<10^{-3}$	10^{-2}	$10^{-5}<k<10^{-7}$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

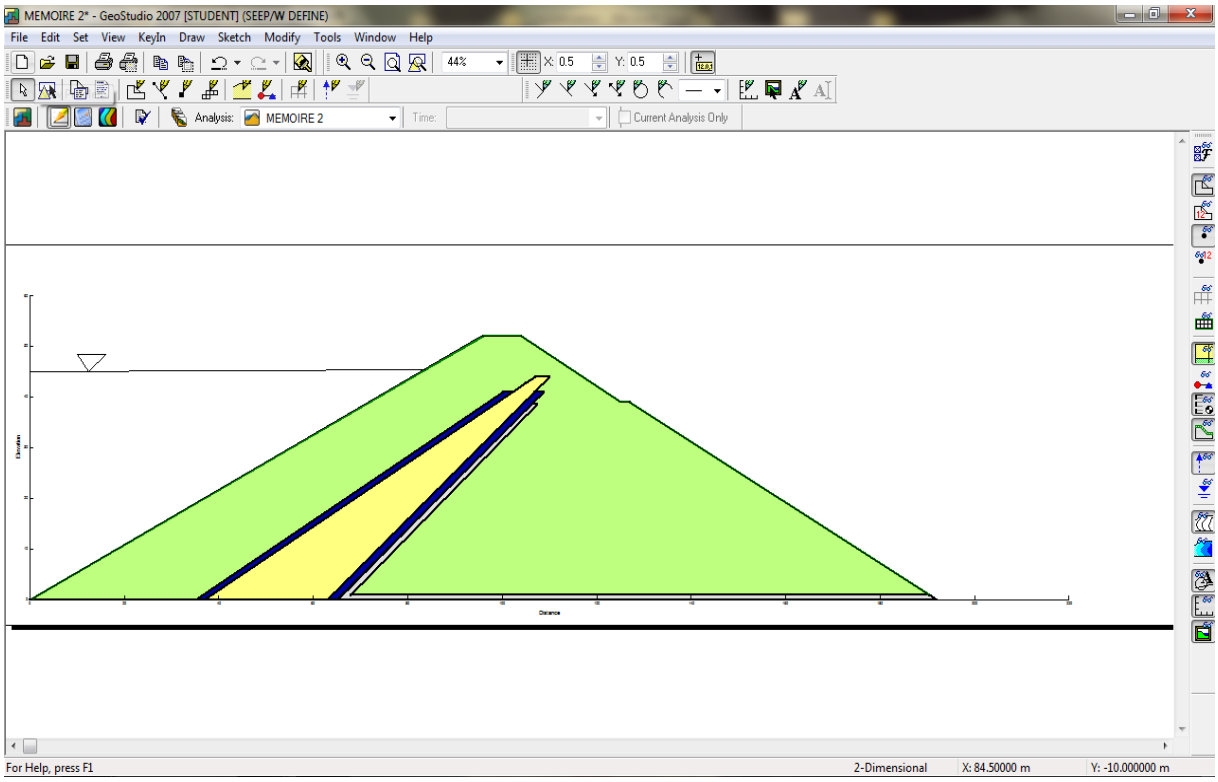

Fig.38 : Profil servant à la modélisation cas N°2

Tableau 5 : Nature des matériaux avec valeur des perméabilités casN°2

Matériaux	Noyau	Filtre	Drain	Recharge
Perméabilité K (m/s)	$10^{-8}<k<10^{-10}$	$10^{-1}<k<10^{-3}$	10^{-2}	$10^{-5}<k<10^{-7}$

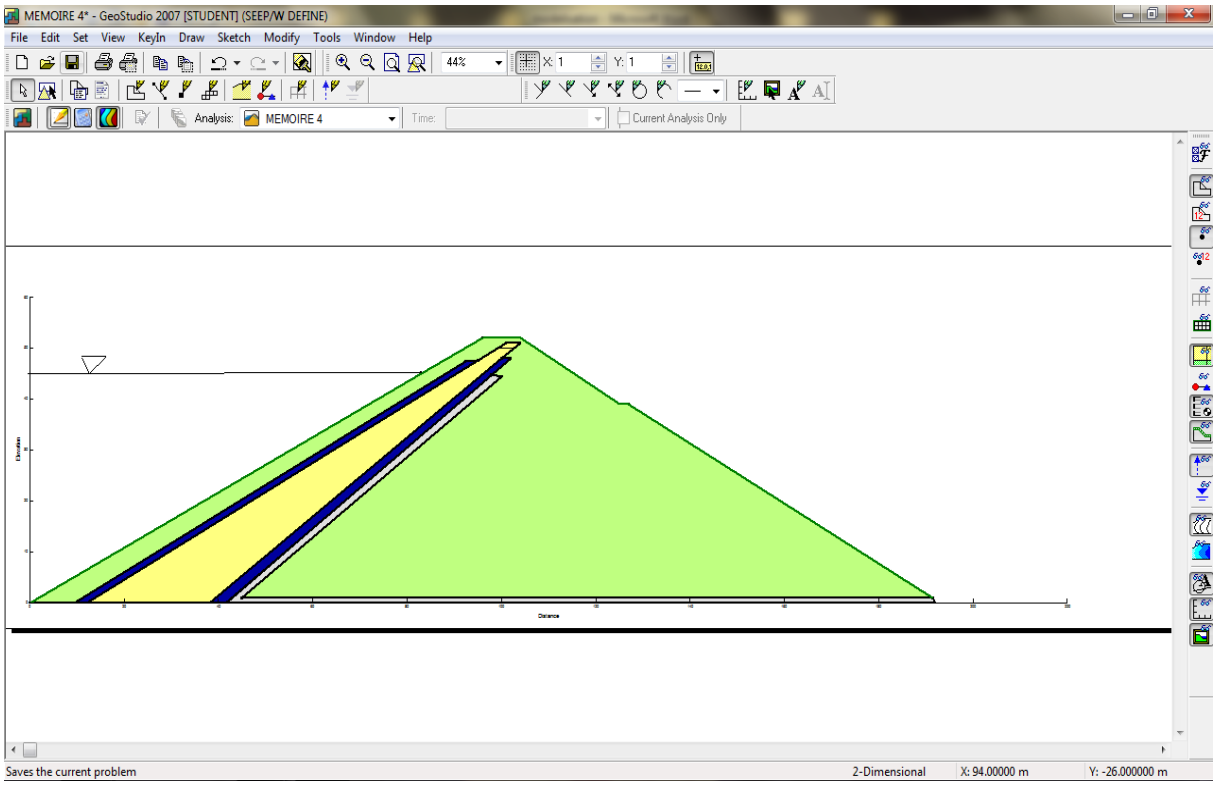

Fig.39 : Profil servant à la modélisation cas N°3

Tableau 6 : Nature des matériaux avec valeur des perméabilités casN°3

Matériaux	Noyau	Filtre	Drain	Recharge
Perméabilité K (m/s)	$10^{-8}<k<10^{-10}$	$10^{-1}<k<10^{-3}$	10^{-2}	$10^{-5}<k<10^{-7}$

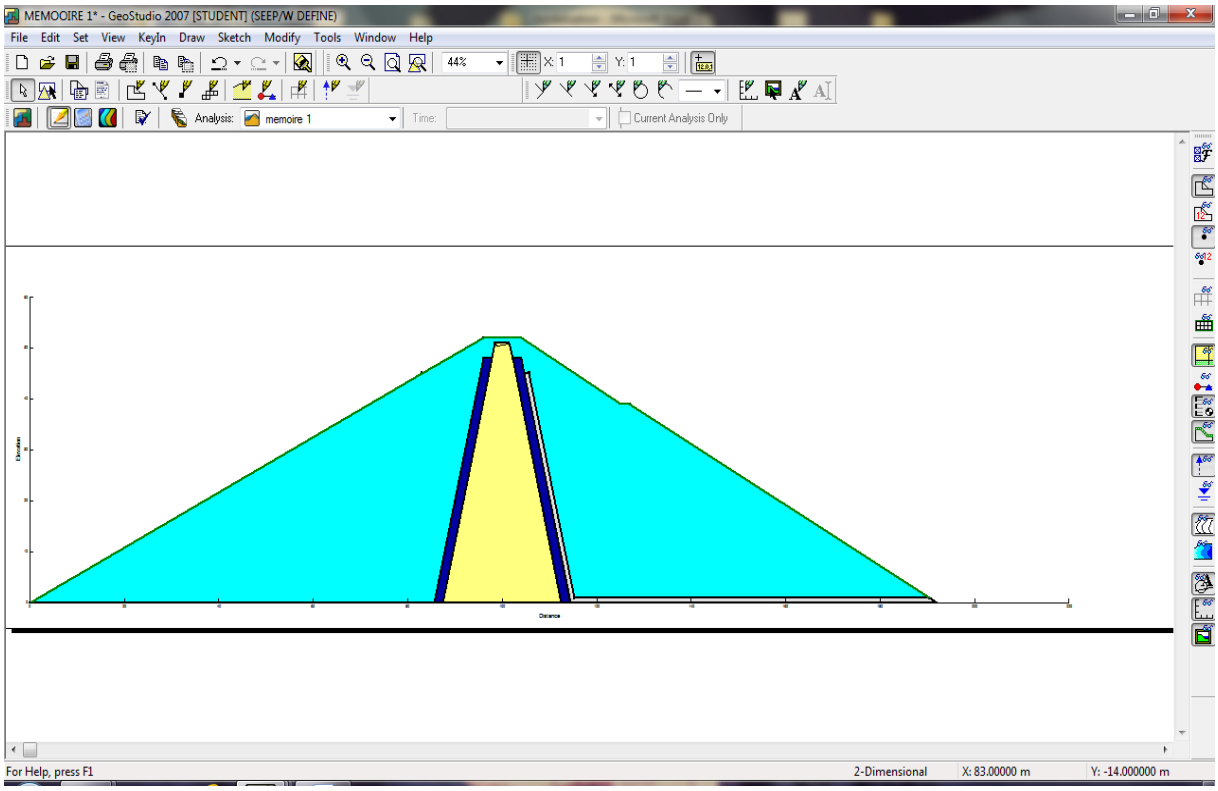

Fig.40 : Profil servant à la modélisation cas N°4

Tableau 7 : Nature des matériaux avec valeur des perméabilités casN°4

Matériaux	Noyau	Filtre	Drain	Recharge
Perméabilité K (m/s)	$10^{-8}<k<10^{-10}$	$10^{-1}<k<10^{-3}$	10^{-2}	$10^{-1}<k<10^{-3}$

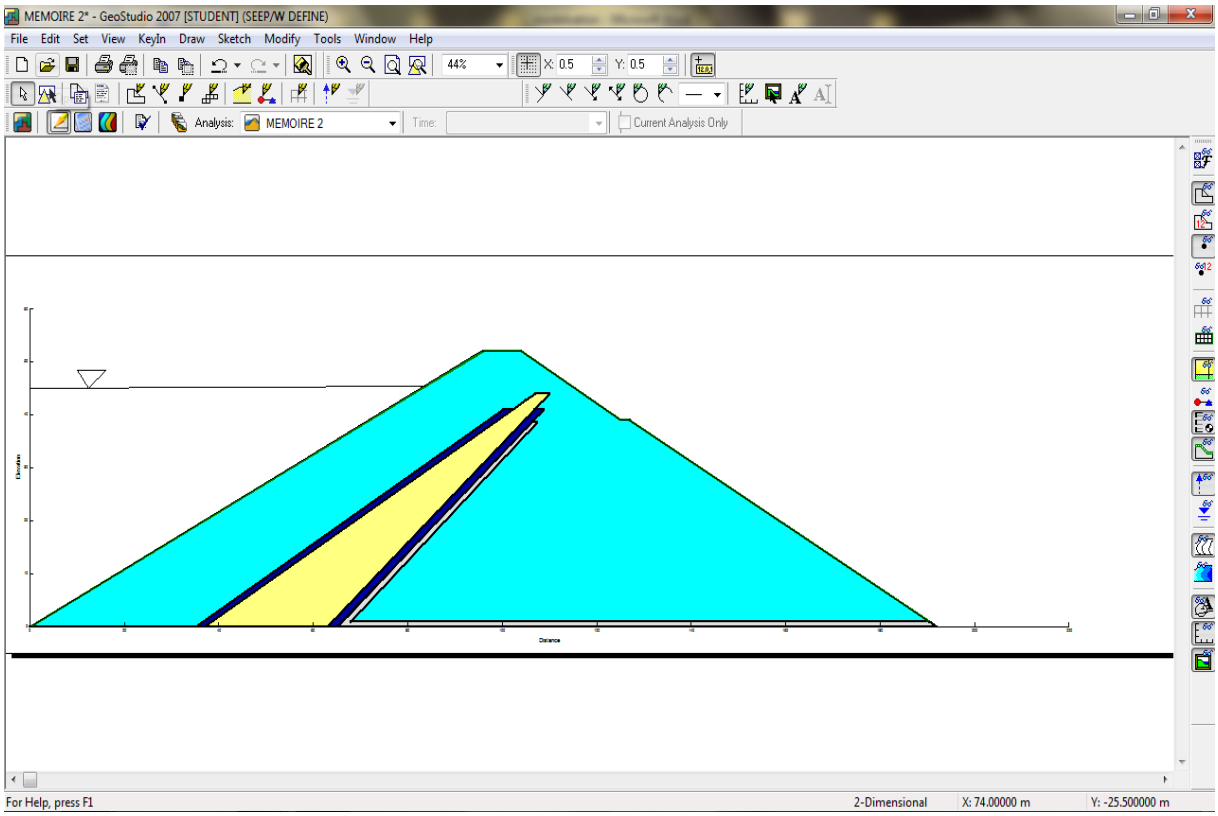

Fig.41: Profil servant à la modélisation cas N°5

Tableau 8: Nature des matériaux avec valeur des perméabilités casN°5

Matériaux	Noyau	Filtre	Drain	Recharge
Perméabilité K (m/s)	$10^{-8}<k<10^{-10}$	$10^{-1}<k<10^{-3}$	10^{-2}	$10^{-1}<k<10^{-3}$

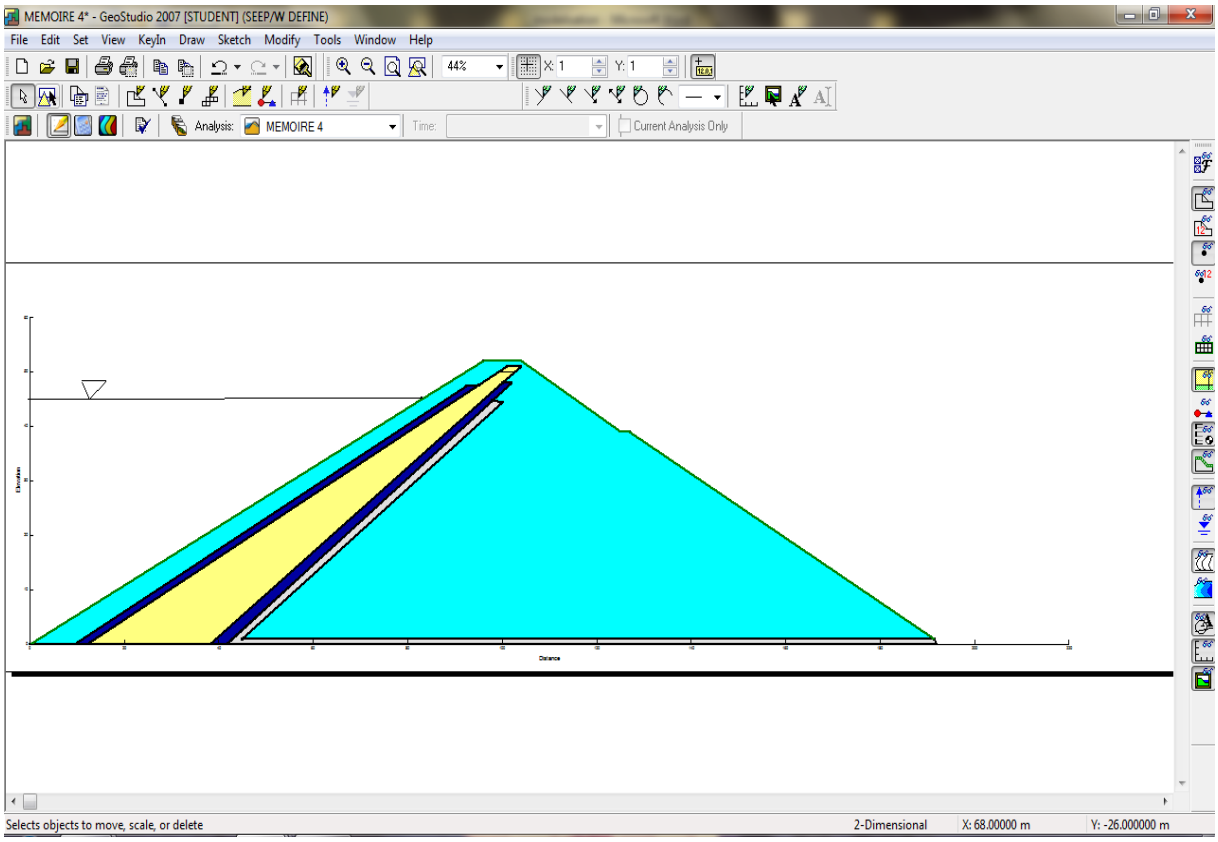

Fig.42: Profil servant à la modélisation cas N°6

Tableau 9: Nature des matériaux avec valeur des perméabilités casN°6

Matériaux	Noyau	Filtre	Drain	Recharge
Perméabilité K (m/s)	$10^{-8}<k<10^{-10}$	$10^{-1}<k<10^{-3}$	10^{-2}	$10^{-1}<k<10^{-3}$

4.6 Résultat de la modélisation :

4.6.1 Présentation :

Les résultats graphiques et analytiques de la modélisation sont présentés pour chaque cas sous forme de :

- trajectoire de la ligne de saturation.

- champs de variation de la pression interstitielle.

-variation de la pression interstitielle selon l'axe vertical.

Les figures de 43 à 48 donnent pour chaque cas de modélisation, les résultats en relation avec la position de la ligne de saturation, le champ des pressions ainsi que leur variation en altitude.

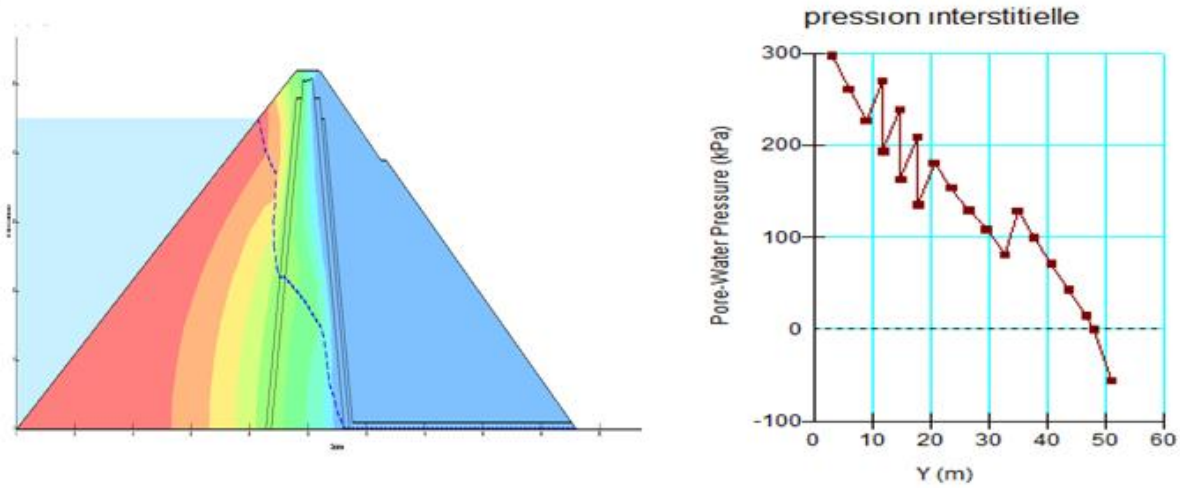

Fig43 : Résultat graphique de la modélisation cas N°1

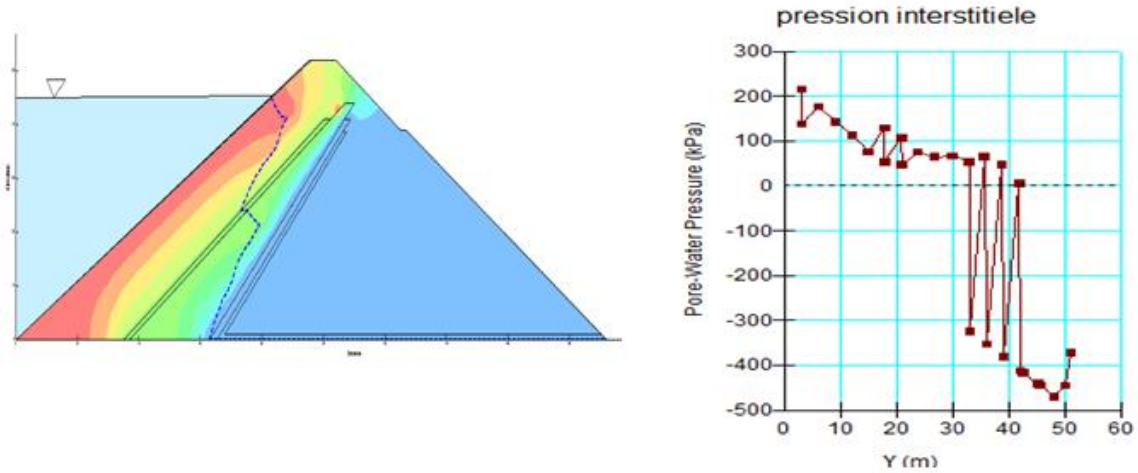

Fig44 : Résultat graphique de la modélisation cas N°2

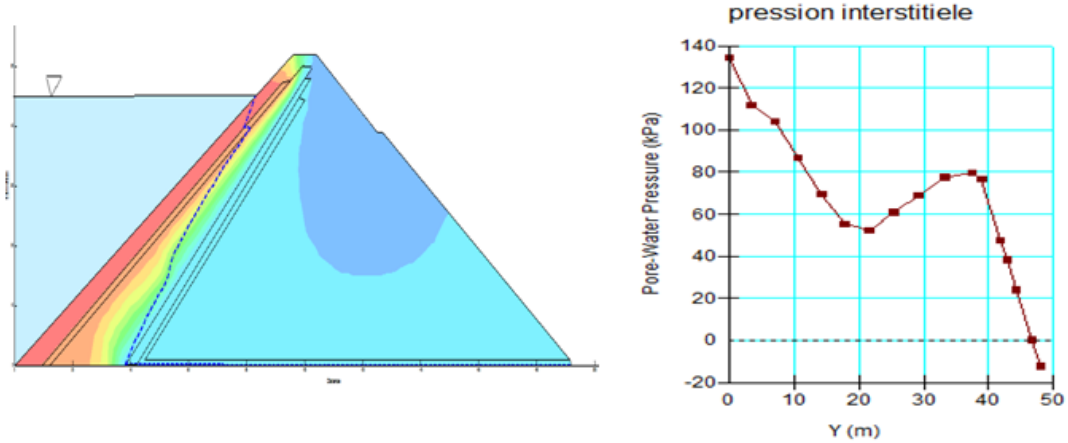

Fig45 : Résultat graphique de la modélisation cas N°3

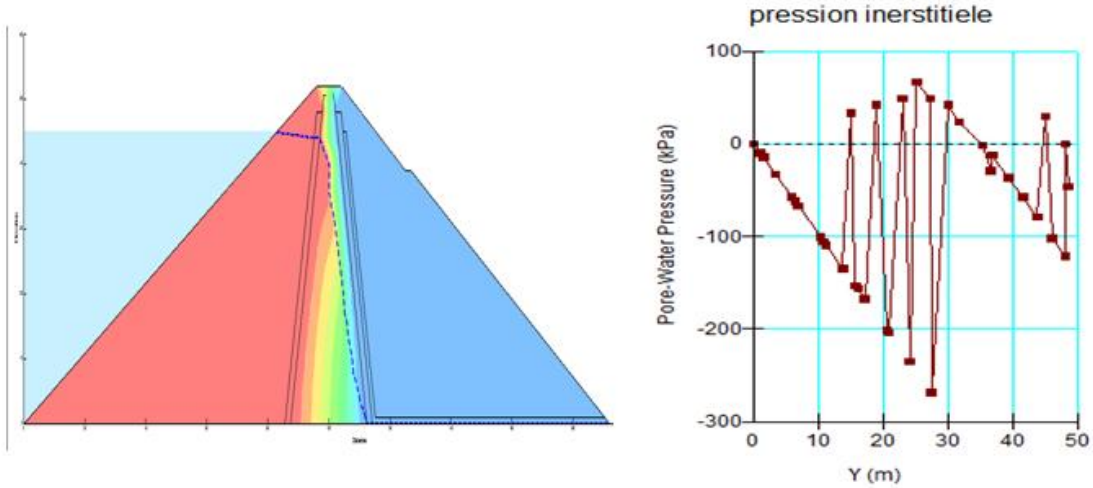

Fig46 : Résultat graphique de la modélisation cas N°4

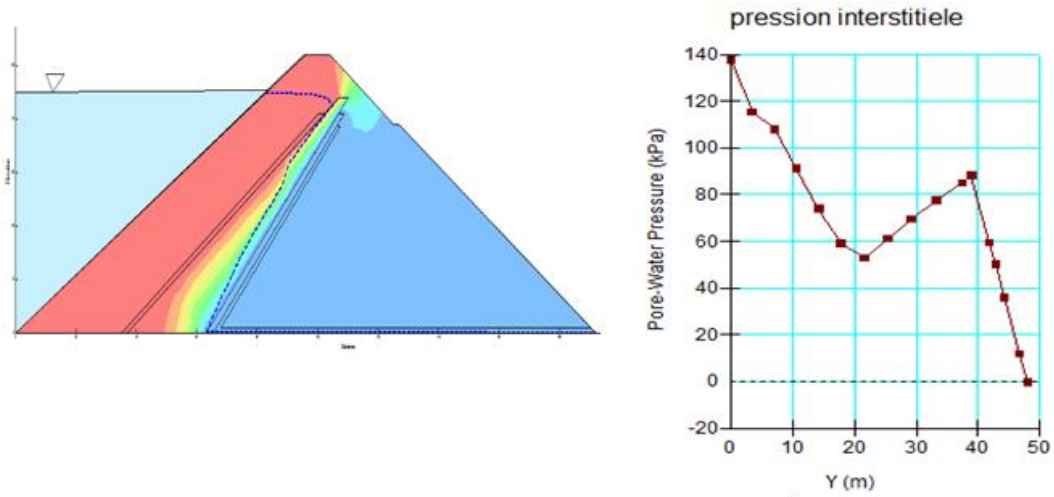

Fig47 : Résultat graphique de la modélisation cas N°5

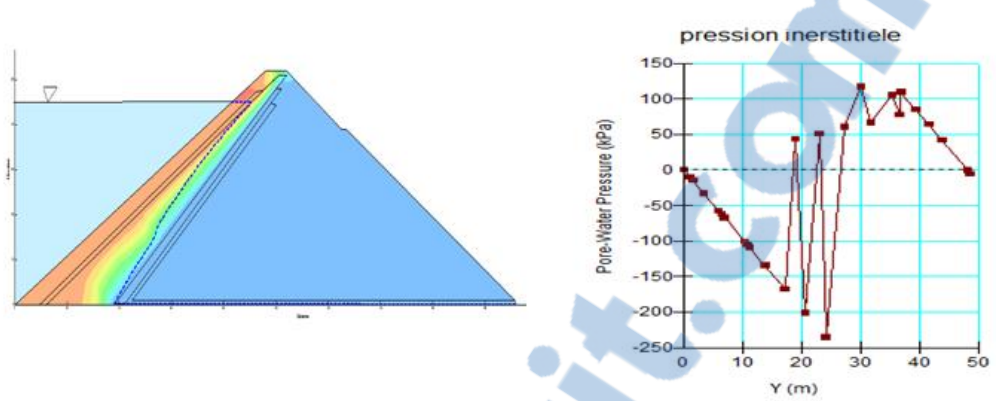

Fig48 : Résultat graphique de la modélisation cas N°6

4.7 Analyse paramétrée des critères de comparaison :

4.7.1 Position de la ligne de saturation :

Pour chaque cas il été évalué le rabattement de la ligne de saturation entre le parement amont du barrage et celui du noyau.la valeur du rabattement aura une influence sur :

- ✓ La charge utilisée pour les paramètre d'évaluation du risque d'érosion mécanique.
- ✓ Le champ de variation de pression, notamment à la base du noyau.

Le tableau N°10 donne pour chaque cas les valeurs du rabattement ainsi que la charge finale à laquelle le noyau

Rapport-Gratuit.com

Tableau10 : Valeur de rabattement de la ligne de saturation

cas	1	2	3	4	5	6
Valeurs de rabattements (m)	23	22.5	5.18	3	3	1
Charge finale appliquée au noyau (m)	22	22.5	39.82	42	42	44

4.6.2 Variation des paramètres liés à l'érosion mécanique à la base du noyau

L'évaluation de la charge appliquée au noyau en relation avec la perméabilité de la recharge amont permet de déterminer les valeur liées aux critère d'érosion mécanique d'une part et de fixer les grandeurs de la base du noyau correspondantes .Le tableau N°11 détaille ,pour chaque cas de modalisation les paramètres obtenus en fonction de l'étude des infiltration dans le massif du barrage.

Tableau11: variation des paramètres liés à l'érosion mécanique à la base de noyau

cas	1	2	3	4	5	6
Valeurs de gradients hydrauliques (base du noyau)	0.88	0.9	1.59	1.68	1.68	2 .66
Valeurs de la base du noyau (m)	44	45	80	84	84	94

4.6.3 Variation du champs de pression interstitielle

La trajectoire quantitative et qualitative de la ligne d'écoulement aura une influence significative sur les variation de la pression interstitielle, n particulier ,au niveau de la base du noyau .Le tableau N°12 résume pour chaque cas de modalisation les valeurs de la pression interstitielles à la base, et à mi-hauteur.

Tableau12: variation des paramètres liés à l'érosion mécanique à la base de noyau

cas	1	2	3	4	5	6
Valeurs de la pression interstitielles (kpa) base de noyau	158.54	221.93	355.45	281	252.72	402
Valeurs de la pression interstitielles (kpa) mi-hauteur	88.03	104.40	185	116	224 .54	208

4.6.4 Variation de l'effet contact entre les recharges et le noyau

Au niveau des barrages zonés à noyaux minces l'action ,des recharges ,sur le noyau sont significatives .L'ampleur de ces actions pente induire une fraction hydraulique à la base du noyau menaçant la sécurité du barrage.

Pour des raisons liées à l'aspect relatif des actions des recharges sur le noyau. Le tableau N°13 récapitule les surfaces de la contact des recharges amont et aval.

Tabeau13 : Variation de l'effet contact entre le noyau et les recharges

cas	1	2	3	4	5	6
Surface de contact de la recharge amont (m^2)	2231.25 (-)	1150 (-)	433.5 (-)	2231.25 (-)	1150 (-)	433.5 (-)
Surface de contact de la recharge aval (m^2)	2027.25 (-)	3031.5 (+)	3901.5 (+)	2027.25 (-)	3031.5 (+)	3901.5 (+)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.6.5 Variation du volume du remblai du rayon

La position du noyau ainsi que sa configuration va induire automatiquement une influence sur le volume des remblais du noyau. Le tableau N°14 montre l'écrête des hauteurs du noyau pour différentes position.

Tabeau14 : Variation du volume des remblais du noyau

cas	1	2	3	4	5	6
Hauteur de noyau (m)	51	44	51	51	41	41

4.7 Conclusion

D'après les résultats détenus de l'étude de variation des différents paramètre, on peut conclure ce qui suit :

- ✓ En terme de charge appliquée sur le noyau ,la variante noyau incliné avancé à 50m offre une meilleure disposition en terme de rabattement de la ligne de saturation (environ 50% de dissipation).
- ✓ En terme de critère lies aux aspects d'érosion mécanique et de dimension de la base du noyau, noyau incliné la variante noyau incliné avancé à 50m offre les mêmes condition que du noyau vertical à savoir i=0.9 et B=45m.

  Les autres variantes nécessitent des base plus importantes allant jusqu'au double
- ✓ Les pressions interstitielles pour la variante noyau incliné avancé à 50 m sont plus ou moins modérées par rapport aux autres variantes et sont proche par apport à celle du noyau verticale avec recharge plus ou moins perméables.
- ✓ Le grand avantage qu'offre la variante noyau incliné avancé à 50m est la surface de contacte avec la recharge avale importante et qui permet d'éviter considérablement, à la fois les problèmes de fracturations hydraulique du noyau ainsi que des sollicitations importantes induisant des déformations excessives.
- ✓ Sur le plan économique, et tenant compte des hauteurs du noyau correspondantes à sa position et configuration. La variante du cas N°2 offre des avantages économique appréciables.

Conclusion générale

Le type de barrage avec noyau est une solution largement répondue. Le barrage consiste en deux corps d'appui amont et aval qui garantissent la stabilité du noyau central situé entre les deux.

Lorsque la fondation est adéquate, c'est-à-dire peu déformable, imperméable et résistante à l'érosion interne, le noyau peut être relativement mince. Ces noyaux minces sont peu pénalisants pour la stabilité des digues, cequi est avantageux. Le noyau , peut dans certains cas être déplacé vers l'amont .On obtient la solution d'une digue à noyau incliné .Plus le noyau est incliné, plus la masse du corps d'appui aval augmente , ce qui représente un certain a tout pour le barrage .Un noyau incliné présente les avantages principaux :

- ✓ Il s'appuie sur le corps d'appui et est comprimé par la poussée de l'eau.
- ✓ Le corps d'appui peut être mis en place de manière indépendante du noyau et donc des délais de la réalisation très compétitifs.
- ✓ Les problèmes liés à la fracturation hydraulique sont pratiquement éliminés.
- ✓ La surélévation éventuelle du barrage est plus facile à réaliser.
- ✓ Il peut être, dans certains cas , financièrement avantageux, par la réduction de sa hauteur ainsi que sa base .

C'est l'ensemble de ces aspects qui ont été rendus explicites par l'évaluation des paramètres y afférents grâce à la modélisation de plusieurs variantes de conception des noyau des barrages zonés.

Il a été , à travers ce mémoire , ilucidé clairement que la conception d'un noyau incliné, avancé judicieusement à l'amont offre de multiples avantages ayant un lien direct avec les rabattements de la ligne de saturation , la distribution des champs de pression intertitielles, avec l'effet de contact et donc la fracturation hydraulique ,avec les critères liés au phénomène d'érosion mécanique , les délais de réalisation du barrage (critère fondamental pour ce type d'aménagements hydrauliques) et enfin avec l'aspect financier , paramètre également capital.

Enfin, ce travail mérite d'être complété par l'évaluation des déformations du noyau pour les différentes cas de conception proposés afin de mettre en évidence, d'une manière valorisée

L'effet de contact entre le noyau et les recharges du barrage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]**BOUSSAAD AKROUR,(**1998),"Utilisation Optimale du Système de Positionnements GPS Pour les travaux d'Auscultation de Barrages", l'université Laval, p19-22

[2] **ANTON J.SCHLIESS ET HENRI POUGATCH ,(**2011), "les barrages :du projet à la mise en service" p.47, 48,55, 57, 503.

[3] **PATRICK LE DELLIOU,(**2003) , "les barrage :conception et maintenance",256P

[4] **MESSAID BELKACEM , (**2009), "étude de la position efficace des drain dans les barrage en terre», thèse doctorat de l'**U**niversité **C**olonel **H**adj-**L**akhdar- **B**atna.

[5**]** **MALFI, ABDELOUAHEB, et AHMED KOLLI,** (2012), " Infiltration dans les barrages en terre et influence de disposition de drainage", de l'université Abou Baker Belkaid.

[6] **JEAN, M, R PAUL, et M PATRICE,** (1996), "Technique des petits barrage en afric sahilianne et ecoitorienne"

[7] **ALONSO CEMADREF**,(2009), ''Barrage en remblai''

[8] **JEAN-PIERRE BECUE , AVEC LA PARTICIPATION DE GERARD DEGOUTTE**, Danièle LAUTRIN, "Choix du site et du type de barrage",

[9] **COMITE INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES.** Géotextiles : "filtres et transition pour barrages en remblai, p18".

[10] **DANIELLE LAUTRIN** , " vieillissement et réhabilitation des petits barrages en terre" ,208P.

[11]**JEAN-MAURICE DURAND**, "Technique des petits barrages en Afrique",414P.

[12] **COMITE INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES**, (1993) , "Barrages en Remblai : protection du talus amont", bulletin 91, 121p. in **MESSAID BELKACEM**

[13] **GROUPE DE SPECIALISTES DE LA DIRECTION D'AMENAGEMENT France,** (1985) , "Technique des Barrages en aménagement rural",Edition Ministère de l'agriculture ,325 p.

[14] **FOUNEME A. MILLOGO**,(2009), ''ouvrage hydraulique''

[15] **BENDAHMANE F**,(2002), "Influence de l'écoulement sur la résistance des sols: étude expérimentale préliminaire- DEA", Université de Nantes, p.62.in **MESSAID BELKACEM**

[16]] **ALONSO E., POULAIN D. et BERNEDE T,** (1994) , "Influence des caractéristiques mécaniques et des pressions interstitielles sur la stabilité des barrages en terre homogènes", journées nationales d'étude AFEID-CFGB « petits barrages », Bordeaux, février 1993, Cemagref édition, pp. 239 - 256.in **MESSAID BELKACEM**

[17] **ALONSO E., LAUTRIN D., POULAIN D., BRUNEL P., MILLER H., VIGNEAU P.et LINO M**., (1995), "Pressions interstitielles de construction dans les barrages en terre. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, " p. 251-256 ,in **MESSAID BELKACEM**

[18] **KEDDOURI Ahmed,(**2011), "Etude Des Pathologies de La Digue de oued Kreirech wilaya de Djelfa", mémoire de magistère de l'université Abou Baker Belkaid,148P

[19] **TECSULT,**(2005) "Monographie de barrage Ain Youcef,volume1,texte figure"

[20] **S-E.PARENT** ,(2007),Introduction à SEEP/W