

République Algérienne Démocratique Et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira De Bejaia



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de la
Technologie



كلية
التكنولوجية

Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département D'Hydraulique
Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée Et Environnement

POLYCOPIÉ DE COURS

LES BARRAGES EN TERRE



DR BRAKENI ABERREZAK

OCTOBRE 2023

AVANT –PROPOS

Le terme « terre » couvre toute une gamme de matériaux allant de l'argile pure très fine à des éléments très grossiers.

Parmi les constructions humaines les plus importantes, les barrages tiennent une place de choix de par leurs dimensions et leurs utilités dans la gestion des ressources en eau. Représentant 70% des barrages dans le monde, les barrages en remblai sont construits en matériaux locaux et ont la grande qualité de convenir aux fondations meubles qui ne peuvent supporter un ouvrage en béton.

Toute la conception d'un barrage en terre vise à satisfaire, en ayant recours aux matériaux naturels disponibles à proximité (les seuls économiquement disponibles en très grande quantité), les conditions de stabilité qui dépendent fortement de deux aspects essentiels :

- ✚ Le contrôle des pressions interstitielles à l'intérieur du remblai, dont on sait qu'elles influent fortement sur la stabilité statique du remblai lui-même, dès la période de construction.
- ✚ Le contrôle des circulations d'eau à l'intérieur du remblai, où elles risquent de provoquer des érosions internes, peut-être encore plus dangereuses que les pressions, car les effets en sont souvent peu visibles jusqu'à la ruine.

Ce présent polycopié de cours sur les barrages en remblai(terre) est destiné plus particulièrement aux étudiants de cycle LMD (Master) en Hydraulique. Il s'inscrit dans les programmes de formation et de préparation de l'étudiant à réaliser ses projets de cours et aux mémoires de fin de cycles.

Il s'articule autour de plusieurs chapitres principaux, qui peuvent se résumer comme suit :

1. Généralités sur les barrages en terre.
2. Etude des infiltrations dans les barrages en terre.
3. Préventions contre le phénomène de renard.
4. Etude de stabilité des barrages en terre ;
5. Sélection des matériaux et méthodes de construction des barrages en terre.

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DE FIGURES

Figure 1.	Différents types de barrages en terre	05
Figure 2.	Impact du débit d'eau sur les ouvrages de retenue	07
Figure 3.	Profil transversale d'un barrage en terre	09
Figure 4	Tracé de la ligne de saturation .Cas d'un barrage homogène	14
Figure 5.	Tracé de la ligne de saturation .Cas d'un drain horizontal	14
Figure 6.	Tracé de la ligne de saturation .Cas d'un drain vertical	14
Figure 7.	Tracé de la ligne de saturation .Cas d'un barrage en noyau	15
Figure 8.	Tracé des lignes équipotentiels et des lignes de courant	15
Figure 9.	Tracé des lignes équipotentiels et des lignes de courant. Cas d'une vidange partielle	16
Figure 10	Débit de fuite avec une couche de fondation perméable	16
Figure 11	Détermination de la pression interstitielle	17
Figure 12	Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage en terre avec fondation perméable	18
Figure 13	Graphe de calcul de a_0	19
Figure 14	Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage en terre avec fondation imperméable et un drain en aval	21
Figure 15	Graphe pour détermination de h	22
Figure 16	Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage en terre avec fondation perméable .Méthode de Pavlovsky	23
Figure 17	Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage en terre avec fondation perméable .Méthode de Choughev	24
Figure 18	Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage en terre avec noyau et drain en aval	25
Figure 19	Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage en terre avec écran et fondation imperméable	27
Figure 20	Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage en terre avec écran et fondation imperméable et un drain en aval	29
Figure 21	Illustration du phénomène de renard dans une retenue d'eau par rideau palplanche	31
Figure 22	Affaissement et submersion d'un barrage en terre mince par un renard.	32
Figure 23	Dispositifs de réduction du risque d'érosion interne	33
Figure 24	Drain tapis filtrant	35
Figure 25	Drain vertical	35
Figure 26	Puits filtrants	35
Figure 27	Barrage avec un noyau argileux compacté	36
Figure 28	Masque amont avec fondation perméable	36

Figure 29	Masque en béton de ciment	37
Figure 30	Ecran vertical	37
Figure 31	Ecran étanche rempli de matériaux argileux	38
Figure 31	Protection du talus contre les vagues	38
Tableau 1	Détermination de la classe des ouvrages hydrauliques	04
Tableau 2	Différents types des barrages en terre.	12

LISTE DES PHOTOS

Photo 1	Choix des matériaux.	43
Photo 2	Grattoirs pour l'enlèvement de la terre végétale.	44
Photo 3	Chargement de terre dans une carrière sur un camion à benne basculante.	45
Photo 4	Grattoir pour préparation de fondation	45
Photo 5	Racleurs pour excavation du déversoir du barrage.	46
Photo 6	Compactage du sol	46
Photo 7	Pose du diapositive anti-filtration sur la pente du barrage.	47
Photo 8	Barrage de Ghrib (Algérie)	47

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS

Chapitre I. Généralités sur les barrages en terre.

Introduction	01
I.1. Buts et objectifs des ouvrages hydrauliques dans la gestion de l'eau	01
I.2. Classification des ouvrages hydrauliques	02
I.2.1. Structures complexes	02
I.2.2. Structures sectoriels	02
I.2.3. Structures permanentes et temporaires	03
I.2.4. Remarques importantes	04
I.2.5. Emplacement et construction des barrages en terre	04
I.2.5.1. Choix du type de barrages en terre	04
I.2.5.3. Remarques importantes	06
I.2.6. Principes de base du calcul des ouvrages hydrotechniques	06
I.2.6.1. Charges et impacts sur les ouvrages hydrotechniques	06
I.2.6.2. Principes de base du calcul des ouvrages hydrauliques	08
I.2.7. Définition du profil d'un barrage en terre	09
I.2.7.1. Dimensionnement du profil en travers de la digue	09
I.2.7.2. Niveau du volume mort (NVM) et niveau normal de la retenue (NNR)	09
I.2.7.3 Niveau des plus hautes eaux (NPHE)	10
I.2.7.4. Calcul de la revanche (R).	10
I.2.7.4. Formule simplifié	10
I.2.7.4. Formule de Pacquant	10
I.2.7.4. Formule de Stevenson	10
I.2.7.4. Formule de Jon Swap	10
I.2.7.5. Calcul de la largeur en crête du barrage	11
I.2.7.5. Formule de T.T. Knappen	11
I.2.7.5. Formules T.B.A.R (techniques des barrages et aménagement rural)	11
I.2.7.6. Pente des talus	11
I.2.7.7. Détermination des bermes	12
I.2.7.8. Les batardeaux	12

Chapitre II. Etude des Infiltration dans les barrages en terre.

II. Introduction	13
II.1. Etude des Infiltration dans le barrage et dans ses fondations	13
II.4.1. Tracé de la ligne de saturation de Kozeny	13
II.4.2. III.4.1. Trace des équipotentielles set des lignes de courants	15
II.4.3. Calcul du débit de fuite par infiltration	16
II.4.4. Calcul de la pression interstitielle	17
II.5. Applications sur les différents types d'un barrage en terre	17
II.5.1. Cas d'un barrage en terre sur une fondation imperméable, sans drain et en absence de l'eau en aval	17

II.5.2. Cas d'un barrage en terre sur une fondation imperméable avec drain et en absence de l'eau en aval	20
II.5.3. Cas d'un barrage en terre sur une fondation perméable avec drain et en présence de l'eau en aval	21
II.5.4. Cas d'un barrage en terre sur une fondation perméable, sans drain et en absence de l'eau en aval	
II.5.4.1. Méthode de Pavlovsky	23
II.5.4.2. Méthode de Choughev	23
II.5.5. Cas d'un barrage en terre avec un noyau et drain sur une fondation imperméable, et en présence de l'eau en aval	24
II.5.6. Cas d'un barrage avec masque et sans drain sur une fondation imperméable et en présence de l'eau en aval	25
II.5.7. Cas d'un barrage avec masque, avec drain sur une fondation imperméable et en absence de l'eau en aval	29

Chapitre III. Prévention contre le phénomène de renard.

III.1. Le phénomène de « Renard »	30
III.1.1. Description	31
III.2. Moyens de reduction du risque d'érosion interne	31
III.3. Etanchéité de la digue et des fondations des barrages en terre	32
III.3.1. Introduction	33
III.3.2. Rôles des drains et des filtres des barrages en terre	33
III.3.3. Drains et filtres	33
III.3.4. Types des drains et filtres dans un barrage en terre	34
III.3.4.1. Drain tapis	34
III.3.4.2. Drain Vertical	35
III.3.4.3. Puits filtrants	35
III.3.4.4. Organes d'étanchéité du barrage	35
1. Noyau argileux compacté	35
2. Parois moulée	35
3. Masque en béton de ciment	36
4. Ecran vertical	37
5. Tapis étanche	37
III.3.4.5. Protection des talus	38
1. Talus amont	38
2. Talus aval	38

Chapitre IV. Etude de stabilité des barrages en terre.

IV.1. Introduction	
IV.2. Méthode de Fellenius	39
IV.3. Calcul sur ordinateur	40
	41

Chapitre V. Sélection des matériaux et méthodes de construction des barrages en terre.

V.1. Introduction	42
V.2. Sélection des matériaux	42
V.3. Méthodes de construction des barrages en terre	43
V.3.1. Exigences générales pour les matériaux des barrages en terre	43
V.3.2. Construction de barrages en vrac et de barrages. Étendue des travaux	44
V.3.3. Sélection de groupes de machines	44
V.3.4. Préparation de la fondation du barrage	45
V.3.5. Remblayage du barrage	46
V.3.6. Compactage du sol	46
V.3.7. Ecrans de barrage	47
V.3.8. Prisme de drainage des barrages	47
V.3.9. Surveillance et entretien des barrages	48
V.3.10. Entretien	49
Références Bibliographique	50

Annexe

Chapitre I. Généralités sur les barrages en terre

Introduction

Le problème de la construction hydrotechnique à des fins complexes et sectorielles est l'une des principales tâches socio-économiques de tout système social visant à répondre aux besoins matériels toujours croissants d'une personne sur la base de l'utilisation rationnelle des ressources naturelles et du développement dynamique des forces productives.

Beaucoup parmi nous pense qu'il est rationnel de n'utiliser que des ressources naturelles utiles épuisables, telles que le pétrole, le gaz, le charbon, divers minerais, etc., en oubliant des ressources non moins importantes, à première vue, apparemment inépuisables : l'air et l'eau. Mais de l'air et de l'eau propres, en quantité et qualité suffisantes, sont la base du développement de la société.

L'eau occupe une place particulière parmi toutes les ressources, le corps humain est composé aux deux tiers d'eau, et si une personne ne compense pas l'inévitable perte d'eau du corps, de graves troubles des fonctions vitales se produisent. Sans eau, une personne meurt en quelques jours.

Avec le développement de la société, l'eau est de plus en plus impliquée dans la sphère de la production : dans l'agriculture, l'industrie, le transport fluvial, les services publics, l'hydroélectricité, la pêche, dans le développement d'une base récréative et sportive, et la création d'un vaste réseau des institutions médicales et récréatives.

En raison du ruissellement irrégulier des eaux de surface, il est nécessaire de créer des réserves appropriées pour couvrir le volume d'eau requis, c'est-à-dire de réguler le débit, ce qui entraînera de nouveaux investissements dans l'aménagement et la construction d'ouvrages hydrauliques complexes et industriels (y compris les stations d'épuration), car une dilution au moins décuplée des eaux usées, même déjà traitées, est nécessaire pour préserver les cours d'eau naturels.

La solution de ces problèmes sera facilitée par la connaissance des bases de la construction de génie hydraulique à des fins complexes et sectorielles par de futurs spécialistes dans le domaine des ouvrages hydrauliques.

I.1. Buts et objectifs des ouvrages hydrauliques dans la gestion de l'eau

Les ouvrages hydrauliques sont des ouvrages d'art destinés à utiliser les ressources naturelles en eau (rivières, lacs, mers, nappes phréatiques) ou à prévenir (réduire) les effets néfastes de l'eau sur l'environnement (lutte contre les crues et inondations, érosion des berges, protection contre les coulées de boue, etc.)

On entend par ouvrages hydrauliques les barrages, les bâtiments des centrales hydroélectriques, les déversoirs, les exutoires et bassins de sortie d'eau, les tunnels, les canaux, les stations de pompage, les écluses maritimes, les élévateurs de bateaux, structures destinées à protéger contre les inondations et la destruction des berges des réservoirs, des berges et des fonds des rivières ; structures (barrages) entourant les installations de stockage des déchets liquides des organisations industrielles et agricoles ; dispositifs de contrôle de l'érosion sur les canaux, ainsi

que d'autres structures conçues pour utiliser les ressources en eau et prévenir les effets néfastes de l'eau et des déchets liquides.

À l'aide d'ouvrages hydrauliques, sont réalisées des activités de gestion de l'eau : sont créés des réservoirs, sont régulés le débit et les niveaux d'eau, sont évacués les glaces et sédiments, l'eau est fournie aux zones résidentielles ou aux entreprises industrielles et les eaux usées sont nettoyées, sont créées des conditions favorables pour le transport par eau et le rafting, la production d'électricité, sont prises des mesures pour reproduire l'industrie de la pêche, etc. [

I.2. Classification des ouvrages hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques sont classés selon leur destination. Ils ont un objectif différent et sont divisés en ouvrages **complexe** et **sectoriel** et sont construits dans une variété de conditions naturelles. Les ouvrages hydrauliques sont classés selon leur destination. Ils ont un objectif complexe et sectoriel et sont construits dans une variété de conditions naturelles. Un complexe hydroélectrique complexe doit être compris comme un ensemble d'ouvrages hydrauliques conçus pour répondre systématiquement aux besoins complexes de gestion de l'eau. En génie hydraulique, on appelle ces structures : des structures à usage général. [Bakhtine 1991].

I.2.1. Structures complexes

Les structures hydrauliques **complexes** sont divisées en types suivants en fonction de leur destination :

- ✚ **Retenue d'eau**, créant des remous, par exemple dans une rivière (barrages et certaines digues qui fonctionnent comme des barrages). De telles structures subissent une pression d'eau inégale de différents côtés du profil transversal. Une section du cours d'eau avec un niveau d'eau supérieur adjacent à l'ouvrage de retenue - le niveau supérieur en amont (NA_M), avec un niveau inférieur -en aval (NA_V). La différence entre les niveaux de l'amont et de l'aval est appelée la charge. Avec une capacité importante du bassin supérieur, il est possible de retenir une partie de l'eau transitant par le cours d'eau en période de crue afin d'utiliser cette eau en période sèche. Dans ce cas, la source est appelée réservoir.
- ✚ **Installations d'approvisionnement en eau**, c'est-à-dire canaux artificiels (canaux, tunnels, plateaux, canalisations) qui fonctionnent indépendamment pour fournir de l'eau depuis le lieu de sa prise de la source d'eau jusqu'au consommateur.
- ✚ **Structures de régulation** du canal, disposées pour réguler le régime de l'écoulement de l'eau, protègent son fond et ses berges de l'érosion.
- ✚ **Installations de prise d'eau** - pour la prise d'eau d'une source d'eau au consommateur.
- ✚ Le **barrage** est le maillon le plus important des ouvrages hydrauliques complexes.
- ✚ Un **complexe hydroélectrique** est un ensemble d'ouvrages hydrauliques unis par les conditions de travail en commun.

I.2.2. Structures sectoriels

Si les ouvrages hydrauliques sont construits pour les besoins d'un seul utilisateur d'eau, ils sont appelés **sectoriels** (dans la littérature pédagogique - structures spéciales). Ce sont des systèmes d'irrigation et de drainage conçus à des fins d'amélioration technique ; transport par voie d'eau (écluses de navires, élévateurs de navires, plateaux de rafting en bois, bateaux) ;

approvisionnement en eau et assainissement (prises d'eau, stations de pompage, installations de traitement, bassins de décantation) ; Ce sont des systèmes d'irrigation et de drainage conçus à des fins d'amélioration technique; transport par voie d'eau (écluses de navires, ascenseurs à navires, plateaux de rafting en bois, vedettes à bois, bateaux); approvisionnement en eau et assainissement (prises d'eau, stations de pompage, installations de traitement, bassins de décantation) ; pêche (passes à poissons, élévateurs à poissons, étangs à poissons); hydroélectricité (stations hydroélectriques, réservoirs d'équilibre, canaux de dérivation et pipelines); structures hydrauliques qui remplissent des fonctions de protection (contre les inondations, les coulées de boue, l'érosion, les glissements de terrain).

I.2.3. Structures permanentes et temporaires

Selon les conditions d'utilisation, les structures hydrauliques sont divisées en **permanentes et temporaires** (nécessaires uniquement lors de la construction ou de la réparation de structures).

- ✚ Toutes les structures **permanentes** sont divisées en quatre classes (de I à IV). La classe des structures est établie en fonction de l'importance économique nationale des structures, en tenant compte des conséquences de leur accident ou de la violation de leur fonctionnement [36]. Les structures hydrauliques **permanentes** sont divisées en **principales et secondaires**.
 - ✚ Les principaux sont les ouvrages, les accidents ou les réparations qui entraînent un arrêt complet du fonctionnement de l'installation ou réduisent significativement l'effet de son fonctionnement (perturbation du fonctionnement normal des centrales électriques, interruption ou réduction de l'alimentation en eau des systèmes d'irrigation, inondation du territoire drainé et inondation du territoire endigué, arrêt ou réduction de la navigation, du transport du bois ou des activités du port fluvial), ouvrages secondaires ou leurs parties individuelles, dont l'arrêt n'entraîne pas des conséquences aussi graves.
 - ✚ La classe IV comprend également les structures temporaires, qui sont utilisées dans la classe IV pour inclure les structures temporaires utilisées lors de la construction d'un complexe hydroélectrique (linteaux), pour éviter les coûts de construction et les routes temporaires.

Pour évaluer la classe des structures, on peut utiliser le tableau. 1.

<i>Principales structures</i>	<i>Type de sol de fondation</i>	<i>Classe des ouvrages hydrauliques</i>			
		<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
		<i>Hauteur de structure ,m</i>			
Barrages en terre	Rocheux	Plus de 100	70...100	25...70	Moins de 25
	Sableux, à gros grains, argileux à l'état solide et semi-solide	Plus de 75	35....75	15...35	Moins de 15
	Argile saturée d'eau à l'état plastique.	Plus de 50	25...50	15...25	Moins de 15

Barrages en béton et en béton armé, structures sous-marines de centrales hydroélectriques, écluses de navigation, structures de levage de navires, murs de soutènement et autres structures en béton et en béton armé participant à la création d'un front de pression.	Rocheux	Plus de 100	60...100	25...60	Moins de 15
	Sableux, à gros grains, argileux à l'état solide et semi-solide	Plus de 50	25...50	10...25	Moins de 10
	Argile saturée d'eau à l'état plastique.	Plus de 25	20...25	10...20	Moins de 10

Tableau 1. Détermination de la classe des ouvrages hydrauliques [Jouravlev 1979, Grichine ,1979].

I.2.4. Remarques importantes :

I. Si un accident d'une structure de rétention d'eau peut avoir des conséquences catastrophiques pour les villes situées en dessous, les grandes entreprises industrielles, les autoroutes de transport, alors la classe de la structure, déterminée selon le tableau. 1.1, il est permis d'augmenter en fonction de l'ampleur des conséquences, avec une justification appropriée.

2. Si un accident d'un ouvrage de retenue d'eau n'entraîne pas de conséquences catastrophiques en aval (lorsque le complexe hydroélectrique est situé dans une zone inhabitée ou à proximité de la mer), alors classe définie dans le tableau. 1, il est permis de diminuer de un.

I.2.5. Emplacement et construction des barrages en terre

I.2.5.1. Choix du type de barrages en terre

Le choix final du choix de l'emplacement du barrage est effectué sur la base d'une comparaison technico-économique des options, en tenant compte des solutions d'aménagement et des coûts d'exploitation de l'unité. Guidé uniquement par la topographie, il convient de situer le site du barrage à l'endroit le plus étroit du cours d'eau perpendiculaire à la direction horizontale.

Les conditions géologiques du site du barrage exigent que les sols à la base du barrage étaient solides et capables de supporter la charge supplémentaire des structures. Par conséquent, il est nécessaire d'accorder une attention particulière à la structure géologique du fourré du réservoir et, lors du choix du site du barrage, de prendre en compte la nature des strates du sol.

I.2.5.2. Barrage en terre et classification : (ISO2.06.05-84)

Les barrages en terre sont appelés ouvrages de retenue d'eau construits sur des sols naturels (argileux, sableux, à gros grains) ou artificiels. Les sols artificiels sont des sols d'origine naturelle, fixés et compactés par diverses méthodes, en vrac, alluviaux, ainsi que les déchets solides des activités industrielles et économiques.

Les barrages en matériaux de sol ne laissent pas l'eau déborder à travers leurs crêtes. Le passage des crues est autorisé dans des cas exceptionnels pour certains types de barrages de faible hauteur. (Figure 1)

Selon la conception du corps et des dispositifs étanches dans le corps et la base, les barrages en terre sont divisés en types, dont les principaux sont indiqués dans le tableau 1 et la figure 1.

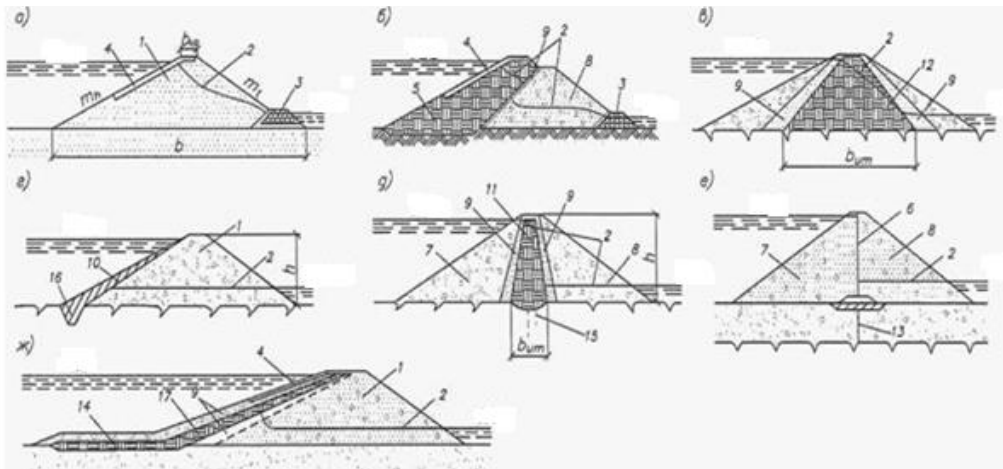


Figure 1 - Types de barrages en terre

1 - corps de barrage ; 2 - surface de dépression; 3 - drainage; 4 - fixation de pente; 5 - prisme imperméable supérieur à partir de matériaux non sol; 6 - diaphragme; 7 - prisme d'équitation; 8 - prisme de base; 9 - couches de transition; 10 - écran en matériaux non broyés; 11 - noyau de sol; 12 - prisme central imperméable au sol; 13 - palplanche ou mur; 14 - abattu; 15 - rideau d'injection (cimentation); 16 - dent; 17 - écran de sol; h est la hauteur du barrage ; b - la largeur du barrage le long du fond.

Eléments du barrage	Type du barrage
<p>Massif du barrage</p> <p>Dispositif étanche à la base du barrage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Homogène (Figure 1, a) • Hétérogène (Figure 1, b, c, e, g) • Avec un tamis de matériaux hors sol (Figure 1, d) • Avec un noyau de sol (vertical ou incliné) (Figure 1, e) • Avec un diaphragme hors sol (Figure 1, f) • Avec un écran au sol (Figure 1, g) • Avec une dent (Figure 1, d) • Avec un rideau d'injection (ciment et autre) (Figure 1, e) • Avec un mur, une languette et une rainure (Figure 1, f) • Avec un abattu (Figure 1, g)

Remarques importantes :

1. Les structures du corps du barrage sont combinées avec diverses conceptions de dispositifs étanches à sa base ; le choix dépend des conditions géotechniques, des caractéristiques physiques et mécaniques de la fondation et est justifié par des calculs et une comparaison technique et économique des options (Figure 1).
2. Lors de la conception de barrages en terre sur une fondation non rocheuse, la préférence doit être donnée aux barrages homogènes, ainsi qu'aux barrages avec dispositif d'étanchéité au sol (prisme, noyau, écran).
3. Lors de la construction de barrages en deux étapes ou plus, ils doivent être conçus comme homogènes ou hétérogènes - avec un prisme supérieur ou un écran imperméable. Chaque étage du barrage doit avoir la force et la stabilité de filtration requises.
4. Les barrages en terre, les barrages, les dispositifs imperméables (PFC) des structures sous pression sous forme d'écrans de sol, de noyaux, d'abattu, avec une justification appropriée, sont construits en déversant du sol dans l'eau.
5. Le sol est versé dans l'eau à la fois dans des étangs artificiels et dans des réservoirs naturels (sans construire de ponts ni organiser de drainage), en tenant compte des profondeurs et des débits.

I.2.6. Charges et impacts sur les ouvrages hydrotechniques. Principes de base du calcul des ouvrages hydrotechniques.**I.2.6.1. Charges et impacts sur les ouvrages hydrauliques.**

La principale caractéristique des ouvrages hydrauliques, contrairement aux ouvrages industriels et de génie civil, est l'interaction constante avec l'eau, au repos ou en mouvement, salée ou douce, qui exerce sur eux divers effets mécaniques, physico-chimiques et biologiques [Bakhtine 1971 ; Grichine 1979 ; Ogurtsov1974]. Expliquons plus en détail les caractéristiques des charges et des influences sur les ouvrages hydrauliques pendant leurs exercices.

Les **effets mécaniques** de l'eau sont divisés en statique et hydrodynamique. Les influences statiques comprennent : la pression hydrostatique de l'eau ; la pression de la couverture de glace qui se produit lorsque la température augmente, la pression des sédiments lorsqu'ils se déposent devant les ouvrages hydrauliques, etc.

La principale de ces influences est la composante horizontale de la pression hydrostatique de l'eau, qui tend à déplacer le structure le long de sa base.

La **pression hydrodynamique** de l'eau se manifeste sous la forme d'un choc jets, banquettes et corps flottants se déplaçant à grande vitesse ; sous forme de vagues de vent ; choc hydraulique ; pression du flux de filtration formé dans le corps de l'ouvrage perméable et dans le fond sous les ouvrages hydrauliques.

De plus, dans les zones sujettes aux tremblements de terre, la pression hydrodynamique résulte des forces sismiques.

Pression horizontale statique de l'eau sur les faces de pression et en aval - les forces P_1 et P_2 (Fig. 2.1, a) sont dirigées dans des directions opposées ; sur la semelle du barrage – P_v (selon la loi d'Archimède, la force de pesée est verticale vers le haut). Les forces de pression hydrostatique sont déterminées selon les lois de l'hydraulique en fonction de la profondeur des bassins.

La différence de niveaux d'eau dans les bassins amont et aval (pression P) est à l'origine de débits de filtration dans le corps de l'ouvrage et dans le socle. Le flux de filtration dans la base sous la structure exerce une pression dynamique sur le pied du barrage – P_R agissant également est appliqué au centre de gravité du schéma et dirigé verticalement vers le haut.

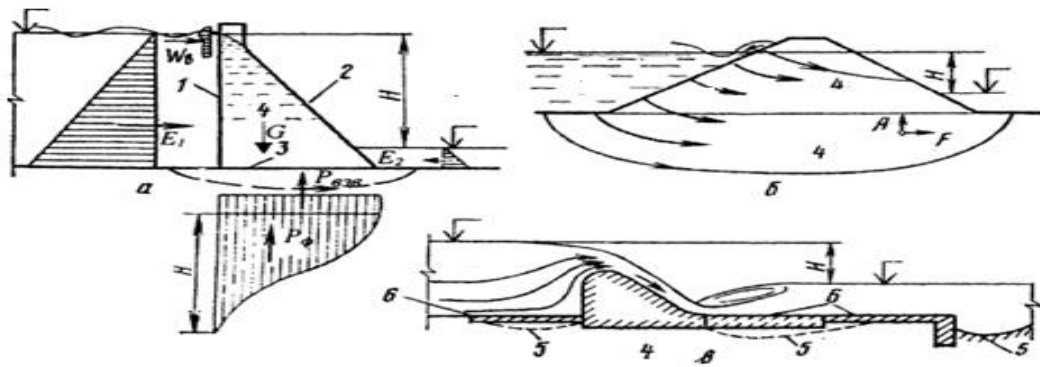


Figure 2. Impact du débit d'eau sur les ouvrages de retenue : a - sur un barrage en béton ; b - sur un barrage en terre ; c - sur le barrage-déversoir en béton
 1 - façade de pression ; 2 - ligne de fond ; 3 - pied de barrage ; 4 - zone de saturation du débit de filtration ; 5 - zone d'érosion "possible" du fond ; 6 - éléments de fixation du contour inférieur ; H – charge sur les barrages.

Lorsque le flux de filtration se déplace, par exemple dans un barrage en terre sablonneuse, une courbe de dépression se forme (Fig. 2, b) en raison de la différence de niveau des bassins supérieur et inférieur. Au-dessus de la courbe de dépression, une zone de remontée capillaire apparaît en fonction des pores du sol : plus les pores sont fins, plus la remontée capillaire est importante. En règle générale, pour les sables à grain moyen, la hauteur de la montée capillaire est de 0,15 ... 0,4 m, pour les sables à grain fin - 0,35 ... 1,0 s. La hauteur maximale de la montée capillaire pour les sols cohérents :

- Limon sableux (avec différentes teneurs en particules de limon) 0,6 ... 1,4 m ;
- Limon limoneux 1,4 ... 4,0 m ;
- Sol poussiéreux 2,5...4,0 m.

Dans la base sous le barrage en terre, des forces F apparaissent (Fig. 2. b), appliquées aux particules en suspension de la base ; si la force de frottement entre les particules est inférieure à la force de projection du F résultant, alors de petits grains de sable commenceront à se déplacer dans les pores entre les gros - une suffusion mécanique se produit, c'est-à-dire élimination des plus petites particules de sol.

L'effet de l'écoulement de surface sur un barrage déversoir en béton est illustré à la fig. (2, c). En amont près de la structure, il y a une augmentation locale de la vitesse, ce qui peut provoquer une érosion du fond et nécessiter un soutien supplémentaire de la base devant la structure (parafouille). Lors du débordement du barrage, la vitesse d'écoulement augmente à mesure qu'elle tombe, et en aval, directement au niveau de la structure, elle dépasse plusieurs fois la vitesse sans danger pour la fondation.

Se déplaçant le long de la surface du déversoir à grande vitesse, le flux, saturé de particules de sol en suspension, a un effet abrasif et abrasif sur le béton. Parfois, pour éviter l'abrasion, il est

nécessaire de tapisser la surface du drain en béton avec de la pierre naturelle durable et même d'utiliser des feuilles de métal.

Une sorte d'action mécanique sont : les vagues, particulièrement importante dans les grands réservoirs. L'action de la vague se manifeste sous la forme d'une charge de vague W_b (Fig. 2, a) à la surface d'une structure rigide non érodée (par exemple, un barrage en béton).

Se heurtant sur la pente supérieure du sol (pression) (voir Fig. 2, b), la vague dépense l'énergie accumulée pour l'érosion locale de celle-ci, de sorte que la pente supérieure du barrage en terre doit être renforcée. Ces charges et impacts doivent être résistés par le propre poids de la structure G , le poids des structures qui s'y trouvent, ainsi que les surcharges d'eau des côtés amont et aval. Le poids propre de la structure G est toujours appliqué au centre de gravité de la section transversale de la structure et est dirigé verticalement vers le bas.

En raison de l'étalement de leur profil transversal, les barrages en terre ne sont pas contrôlés en cisaillement le long de la base, leurs pentes peuvent s'avérer instables.

I.2.6.2. Principes de base du calcul des ouvrages hydrauliques

Les calculs des ouvrages hydrauliques et de leurs bases doivent être effectués selon la méthode des conditions limites. Selon Grichine (Grichine 1979), la possibilité d'apparition de limite est évaluée en comparant les valeurs des efforts, des contraintes, des déformations, des déplacements, des ouvertures de fissures, etc. avec leurs limites. Les calculs doivent être effectués pour deux groupes de conditions limites :

- ✚ **Premier groupe** (inadéquation totale des structures, structures des fondations à l'exploitation) - calculs de la résistance et de la stabilité globales du système "structure - fondation" ; calcul de la résistance globale de filtration des fondations et des structures du sol ; calcul de la résistance des éléments individuels des ouvrages dont la destruction entraîne l'arrêt de l'exploitation des ouvrages ; calculs des mouvements des structures, dont dépendent la résistance ou la stabilité des structures dans l'ensemble, etc....
- ✚ **Second groupe** (inadéquation au fonctionnement normal) - calculs des bases de résistance locale ; calculs pour limiter les déplacements et les déformations, la formation ou l'ouverture de fissures et de joints de construction, l'écart de la résistance de filtration locale ou de la résistance des éléments individuels des structures, pas pris en compte en premier groupe.

Lors du calcul des structures hydrauliques, de leurs structures et fondations, la condition suivante doit être respectée pour s'assurer que les états limites ne se produisent pas.

$$n_c N_{Calcul} \leq R \times \gamma_c / K_{sec} \quad (1)$$

Où :

n_c = coefficient de combinaison de charge est égal à :

- ✚ En exploitation = 1.0 ;
- ✚ En période de construction et de réparation = 0.95

N_{calcul} = valeur calculée de la force d'impact généralisée (force, moment, contrainte) ;

R = valeur de calcul de la capacité portante généralisée des déformations ;

γ_c = coefficient des conditions de travail tenant compte du type de structure, des structures et des fondations, du type de matériau. ($\gamma_c = 1.0$) ;

K_{sec} = facteur de sécurité pour l'usage de la structure :

- ✚ Pour le premier groupe des ouvrages hydrauliques K_{sec} est pris comme suit :
 - Classe I..... 1.25
 - Classe II.....1.20
 - Classe III..... 1.15
 - Classe IV..... 1.10
- ✚ Dans les calculs pour l'état limite du deuxième groupe, K est égal à 1.
- ✚

I.2.7. Définition du profil d'un barrage en terre

I.2.7.7.1. Dimensionnement du profil en travers de la digue.

Les grands types de barrages en remblai sont : (Degoutte 1997)

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

I.2.7.2. Niveau du volume mort (NVM) et du niveau normal de la retenue (NNR).

La partie du cours d'eau au-dessus du tracé du barrage est appelée- Amont en dessous du tracé - Aval. Du fait du reflux d'eau par le barrage, un réservoir se forme en amont, dans lequel on distingue trois niveaux d'eau calculés :

- ✚ Niveau des hautes eaux (NPHE) ;
- ✚ Niveau de rétention normal (NNR) ;
- ✚ Niveau de volume mort (NVM).

Le volume du bassin supérieur, conclu entre le NPHE et Niveau avale, est appelé volume utile, et celui situé en dessous du niveau NVM est appelé mort.

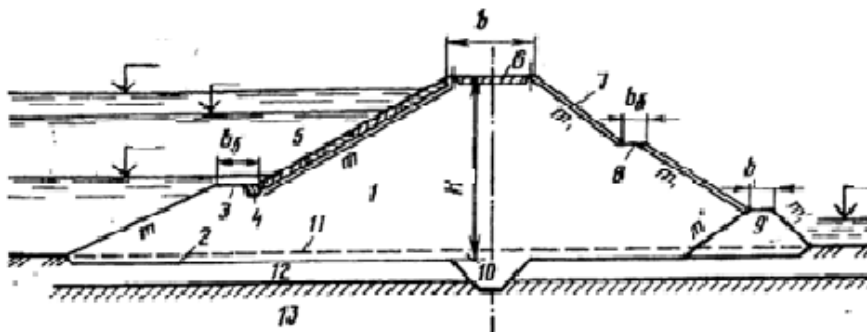


Figure 3 : Profil transversale d'un barrage en terre homogène

1. Massif du barrage ; 2. Fondation du barrage ; 3. Bermes ; 4. Butée ; 5.7. Fixation des talus ; 6. crête du barrage ; 9. Drain ; 10. jointure ; 11. enlèvement de la terre végétale ; 12. couche d'alluvions ; 13. fondation imperméable ; b = largeur de la crête ; b_{berm} = largeur de berme

I.2.7.3. Niveau des plus hautes eaux (NPHE).

La hauteur maximale au-dessus de déversoir des crues dépend des caractéristiques de l'évacuateur. On appelle niveau des plus hautes eaux, le niveau normal de la retenue auquel on rajoute la hauteur de la charge sur le déversoir.

$$NPHE = NNR + H \quad (2)$$

I.2.7.4. Calcul de la revanche (R).

Parmi tous les risques, l'accident le plus grave qui menace l'existence d'un barrage en terre est la submersion. Afin d'éviter ce danger, on doit assurer une hauteur dite « Revanche » entre le niveau des hautes eaux et la crête du barrage. Cette revanche prend en compte les hauteurs des vagues susceptibles de déferler sur la digue, la hauteur des vagues étant fonction de la force des vents, de leur direction et de la longueur de « Fetch ». (Costet and al, 1983)

Le calcul de la revanche est donné par plusieurs formules empiriques parmi lesquelles nous cotons :

✚ Formule simplifié

$$R = 1.00 + 0.3 \times \sqrt{F} \quad (3)$$

Avec :

R = Revanche en metre.

F = Fetch (longueur du plan d'eau) en Km.

✚ Formule de Pacquant

$$R = 0.75 \times h_v + \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

Avec :

h_v = hauteur des vagues en (m). (déterminée par la formule de pacquant : $h_v = 0.5 + 0.33 \times F$)

v = vitesse de propagation des vagues (m/s).

g = accélération de la pesanteur ($g = 10 \text{ m}^2/\text{s}$).

$\frac{v^2}{2g}$ = L'effet de propagation vers le haut pour une vague de vitesse « v ».

✚ Formule de Stevenson :

Pour $F \leq 18 \text{ km}$
$$h_v = 0.75 + 0.34 \times \sqrt{F} - 0.25 \times \sqrt[4]{F} \quad (5)$$

✚ Formule de Jon Swap.

Cette formule est valable pour les conditions en eau profonde.

$$h_v = 0.0016 \times V_{vent} \times \sqrt{\frac{F}{9}} \quad (6)$$

Avec,

V_{vent} = vitesse de vent en m/s;

F = fetch en m;

g = accélération de la pesanteur en m^2/s ;

T = période d'onde associée une vague de hauteur H à une hauteur L donnée par: $L = 1.55 \times T^2$

Remarque :

Les formules empiriques utilisées pour le calcul de la revanche « R » ne dépendent ni de la durée du vent ni de sa vitesse d'où une sous-estimation de la hauteur des vagues.

En effet, il sera très grave d'adopter des valeurs insuffisantes pour ces hauteurs et par conséquent pour la revanche on adoptera :

$$R_{max} = R_{moy} + a \quad (7)$$

a = étant une hauteur de sécurité due :

- ✚ L'élévation de l'eau près du barrage
- ✚ Surélévation maximale des ondes.
- ✚ Autres effets naturels (tassement, séisme ... etc.).
- ✚

I.2.7.5. Calcul de la largeur en crête du barrage

La largeur en crête « L » est en général donnée par des formules empiriques.

✚ **Formule de T.T. Knappen :**

$$L = 1.65 \times \sqrt{H} \quad (8)$$

✚ **Formule T.B.A.R (techniques des barrages et aménagement rural) :**

$$L = 3.6 \times \sqrt[3]{H} - 3 \quad (9)$$

I.2.7.6. Pente des talus

Dans le cas des barrages en terre, il n'existe pas des formules théoriques ou empiriques permettant le calcul des pentes des talus, toutefois, il existe des tableaux donnant différentes pentes en fonction de la hauteur du barrage et de la composition des recharges.

Hauteur (m)	Type du barrage	Pente de talus	
		Aval	Amont
2 à 5	Homogène	1/2	1/2.5
	à zone	1/2	1/2
5 à 10	Homogène	1/2	1/2
	Homogène à fort% d'argile	1/2	1/3
	à zone	1/2.5	1/2
10 à 20	Homogène	1/2.5	1.2.5
	Homogène à fort% d'argile	1/2.5	1/3
	à zone	1/3	1/2
> 20	Homogène	1/2.5	1/3
	Homogène à fort% d'argile	1/2.5	1/3.5
	à zone	1/3	1/3

Tableau 2 : Pentés des talus en fonction du type et la hauteur du barrage.

I.2.7.7. Détermination des bermes.

Une berme est une plateforme que l'on peut utiliser lors de la construction des remblais, il est conseillé de disposer des bermes chaque 10 à 15 m de la hauteur du barrage, ceux-ci sont utilisées comme moyen pour la circulation des engins et pour augmenter la stabilité du barrage.

	Talus amont	Talus aval
Cote de berme(m)	20.0	20.0
	12.0	10.0
Largeur de berme (m)	6.0	6.0
	10.0	10.0
Pente de berme	1/2	1/2
	1/2.5	1/2.5
	1/3	1/2

Tableau 3. Détermination des talus des bermes

I.2.7.8. Les batardeaux

Le batardeau est une sorte de digue réalisée dans la partie amont du barrage qui sert pour stocker les eaux de l'Oued et les déviées vers la galerie : de dérivation provisoire.

Chapitre II. Etude des Infiltration dans les barrages en terre.

Introduction

L'étude des infiltrations consiste essentiellement en la détermination des équipotentiels et des lignes de courant.

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

- ✚ Ligne de saturation La ligne de saturation est une ligne suivant laquelle la pression à l'intérieur du massif est égale à la pression atmosphérique, elle sépare la zone humide de la zone sèche.
- ✚ Les pressions interstitielles Elles peuvent être déterminées à partir du tracé d'un réseau de lignes équipotentiels (les lignes équipotentiels sont des lignes fictives d'égale pression).
- ✚ Débit de fuite. Ce débit du aux infiltrations est un indice de fonctionnement de l'ouvrage, il doit être calculé et contrôlé en continue. il est obtenu à partir du réseau de lignes de courant, orthogonales aux lignes équipotentiels. Ces lignes théoriquement représentent la trajectoire de l'eau à travers le barrage.

En un point du barrage, le potentiel hydraulique E peut être exprimé par la somme du potentiel dû à la cote z du point et à la pression de l'eau en ce point exprimée en hauteur d'eau p :

$$E = z + p \quad (10)$$

L'écoulement de l'eau d'infiltration dans le barrage et dans ses fondations est régi par la loi de Darcy :

$$v = k \times I \quad (11)$$

Avec : v = vitesse d'écoulement de l'eau ou d'infiltration en m/s

k = coefficient de perméabilité de Darcy en m/s

I = gradient hydraulique de filtration

L'étude des infiltrations peut se faire par calcul numérique sur ordinateur, ou par des méthodes simplifiées basée sur des approximations et des propriétés graphiques du réseau d'écoulement.

La méthode simplifiée, le plus souvent utilisée dans les pays occidentaux (Parabole de Kozeny), donne des solutions approchées, mais en général suffisantes. Pour une infiltration avec une charge d'eau avale, Pavlovsky et Chougayev, proposent des méthodes différentes simplifiées aussi pour le calcul de lignes d'infiltrations et du débit de fuite à travers le massif du barrage et ses fondations.

II.1. Tracé de la ligne de saturation de Kozeny.

Kozeny a montré que, dans un barrage en terre homogène non drainé, la ligne de saturation peut être assimilée dans sa partie médiane à une parabole d'axe horizontal dont le foyer O est situé au pied du parement aval du barrage. L'équation de cette parabole s'écrit :

$$y^2 - y_0^2 - 2xy_0 = 0 \quad (12)$$

Avec, $y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$,

d = la largeur en base du barrage diminuée de $0.7 b$;

b = la projection horizontale de la partie mouillée du parement aval.

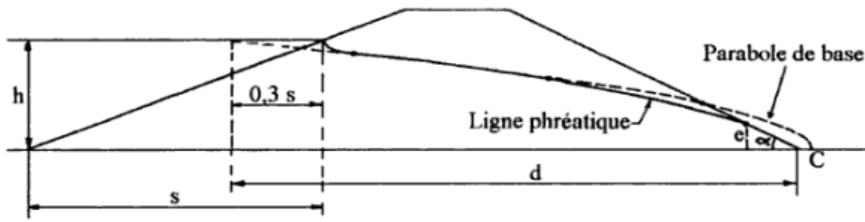


Figure 4. Tracé de la ligne de saturation. Cas d'un barrage homogène

La parabole coupe le plan d'eau amont en un point A situé à une distance horizontale de ce parement $AB=0.3b$.

Pour obtenir la ligne de saturation à partir de la parabole de Kozeny, on raccorde celle-ci au point B du plan d'eau amont par une courbe normale au parement amont en B et tangente à la parabole. En aval on fait aboutir la ligne de saturation en un point D sensiblement situé au $2/3$ de OC , théoriquement tel que : $\frac{DC}{OD} = \frac{3}{8} \cos \frac{\alpha}{2}$.

En général les barrages en terre sont munis d'un drain aval qui rabat la ligne de saturation à l'intérieur du barrage. Dans ce cas la parabole de Kozeny a pour foyer l'extrémité amont du drain auquel se raccorde la ligne de saturation. (Figure 5 et 6).

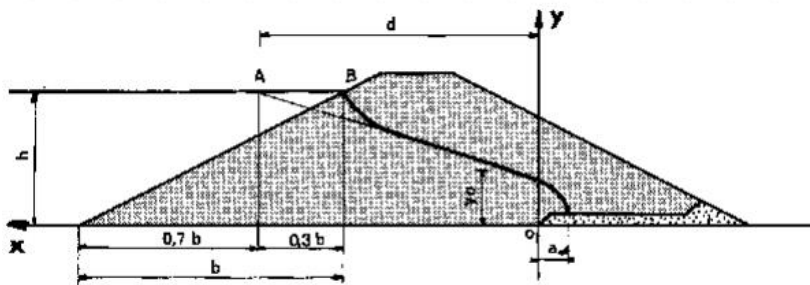


Figure 5. Tracé de la ligne de saturation. Cas d'un drain horizontal

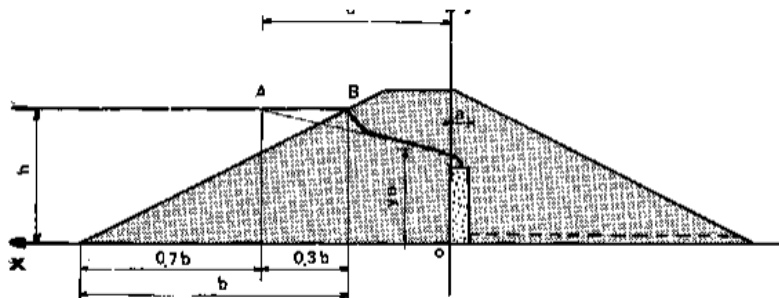


Figure 6. Tracé de la ligne de saturation. Cas d'un drain vertical

Dans le cas d'une digue à noyau imperméable, maintenu par des zones perméables, la ligne de saturation est construite en ne considérant que le noyau imperméable. (Figure 7)

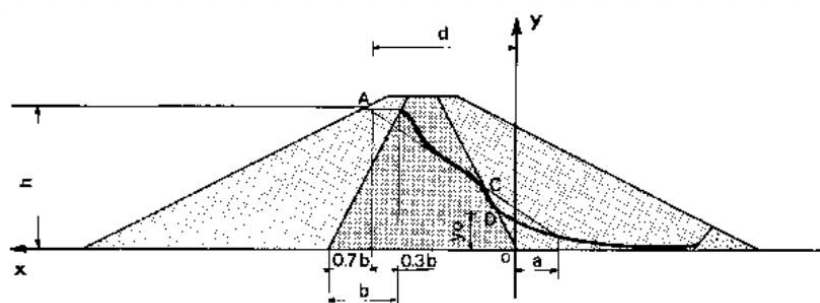


Figure 7. Tracé de la ligne de saturation. Cas d'un barrage à noyau.

II.2. Trace des équipotentiels et des lignes de courants.

La ligne phréatique, en pratique confondue avec la ligne de saturation, étant tracée, la construction des équipotentiels peut être faite graphiquement (figure 8).

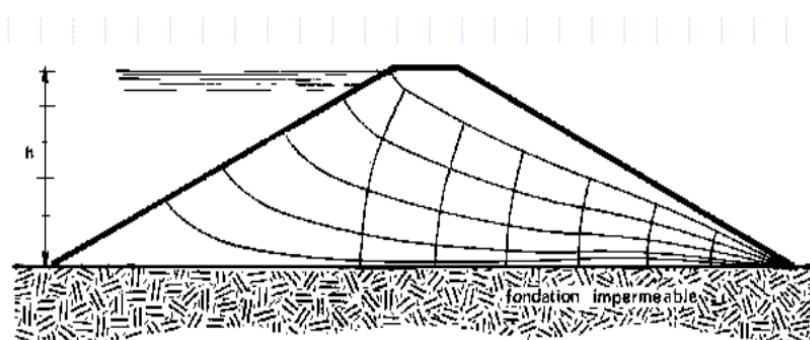


Figure 8. Tracé des équipotentiels et des lignes de courant.

- ✚ Le parement aval est une ligne équipotentielle.
- ✚ La ligne phréatique ainsi que le contact avec la fondation imperméable sont des lignes de courant.
- ✚ Les lignes d'écoulement représentent les voies d'écoulement des particules d'eau ;
- ✚ Les lignes d'écoulement et lignes équipotentiels sont orthogonales les unes par rapport aux autres ; Le débit entre deux lignes d'écoulement adjacentes est constant (dq) ;
- ✚ La différence de hauteur manométrique entre deux lignes équipotentiels est la perte de charge (Δh) ;

Cette construction des lignes de courant concerne le cas d'une retenue pleine. Dans le cas de la vidange rapide les lignes se répartissent différemment (figure 9)

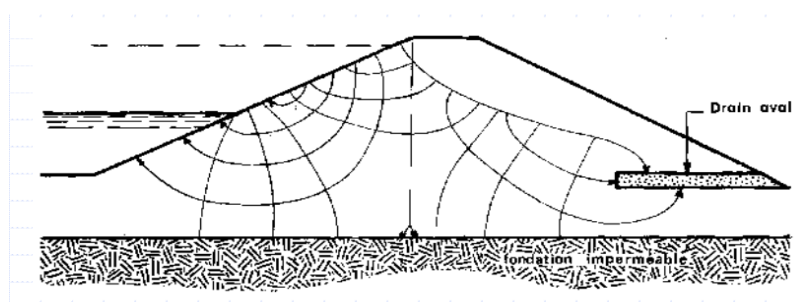


Figure 9. Tracé des équipotentiels et des lignes de courant. Cas d'une vidange partielle

II.3. Calcul du débit de fuite par infiltration.

Connaissant le réseau des équipotentielles et des lignes de courant, on peut évaluer approximativement le débit de fuite en appliquant la loi de Darcy, le gradient hydraulique moyen le long d'une ligne de courant de longueur moyenne L étant égal à $I = \frac{H}{L}$, H étant la hauteur de l'eau à l'amont du barrage (figure 5). En designant S la longueur mouillée du parement amont du barrage, le débit q par mètre linéaire de barrage sera :

$$q = S \times k \times I = S \times k \times \frac{H}{L} \quad (14)$$

Avec,

- I = gradient hydraulique moyen le long d'une ligne de courant de longueur moyenne L
- H : hauteur d'eau à l'amont du barrage ;
- S = la longueur mouillée du parement amont

Dans le cas d'une fondation relativement perméable (figure 10), on admet que la longueur moyenne de la ligne de courant est celle de la ligne de contact du massif imperméable avec la fondation plus perméable. D'après la figure 10, on a :

$$L = B + 2F \quad (15)$$

$$q = (T - F) \times k \frac{H}{B + 2F} \quad (16)$$

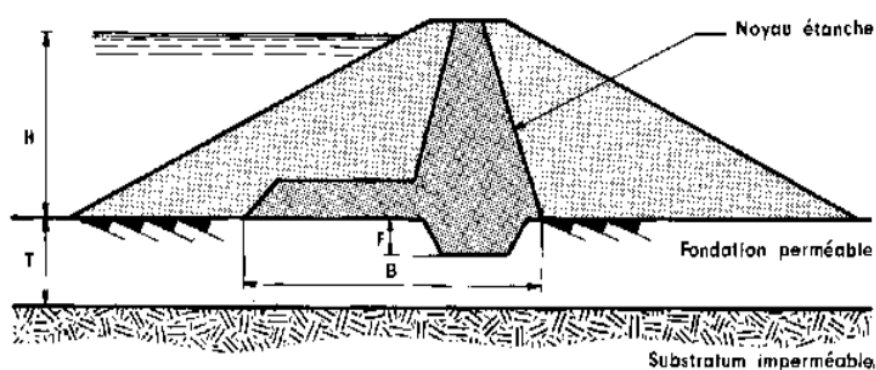


Figure 10. Débit de fuite à une couche de fondation perméable

II.4. Calcul de la pression interstitielle.

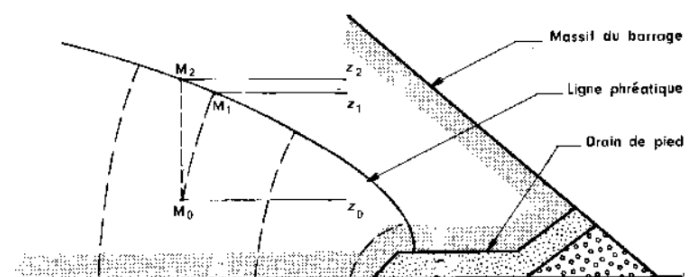


Figure 11. Détermination de la pression interstitielle

Quand on dispose du réseau d'équipotentielles, il est facile d'en déduire la pression interstitielle en tout point. Considérons un point M_0 dans le massif du barrage et calculons sa pression. A partir de M_0 on trace à l'estime une courbe équipotentielle s'intégrant dans le réseau. Cette courbe coupe la ligne phréatique en un point M_1 de potentiel égal à la cote de ce point, soit z_1 .

L'égalité des potentiels en M_0 et M_1 s'écrit : $z_0 + p_o = z_1$, d'où la pression interstitielle : $p_o = z_1 - z_0$, exprimée en metre d'eau.

II.5. Applications sur les différents types d'un barrage en terre.

II.5.1. Cas d'un barrage en terre sur une fondation imperméable, sans drain et en absence de l'eau en aval

Procédure de calcul : Dans le cas où l'eau est présente dans le coté aval, les équations utilisées sont les suivantes :

$$\frac{q}{k} = \frac{H_b - d_0 - h}{m_1} \times 2.3 \log \frac{H_b}{H_b - h} \quad (1)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{h^2 - a_0}{2 \times L} \quad (2)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{a_0}{m_2} \quad (3)$$

$$L = b_b + m_2(H_b - a_0) \quad (4)$$

Egalisons les deux parties droites des équations (2) et (3), on aura déterminé la valeur de h :

$$h = \sqrt{\frac{2 \times a_0 \times L}{m_2} + a_0^2} \quad (5)$$

En substituant la valeur de L dans cette équation, on aura comme résultat l'équation suivante :

Application 1:

Construire la ligne de saturation et déterminer le débit spécifique de filtration à travers un barrage en terre sur une fondation perméable et en absence de l'eau à l'aval, si:

$b_b = 8.0\text{m}$, $m_1 = 3.0$, $m_2 = 2.0$, $d_0 = 2.5\text{m}$, $k = 0.0055\text{m/j}$. (figure 1).

Déterminer la vitesse de filtration a la sortie du barrage.

Solution

pour simplifier le calcul, on procède a la méthode graphique. le calcul est résumé dans le tableau suivant:

a_0	$\frac{m_1}{m_2} \times a_0 = F_1(a_0)$	L	D	E	$(H_b - d_0 - D) \times E = F_2(a_0)$
1	1.5	36.0	6.08	0.519	3.32
2	3.0	34.0	8.49	0.893	3.56
3	4.5	32.0	10.25	1.032	2.32
2.24	3.36	33.58	8.98	0.820	3.36

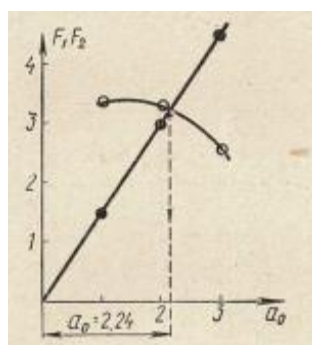


Figure 13. Graphe de calcul de a_0 .

En trouvant graphiquement a_0 , déterminons les autres valeurs comme suit:

$$q = \frac{a_0}{m_2} \times k = \frac{2.24}{2.0} \times 0.055 = 0.00623\text{m}^3 / \text{j}$$

$$L = b_b + m_2(H_b - a_0) = 8.0 + 2.0(15.0 - 2.24) = 33.58\text{m}$$

Les ordonnées de la ligne de saturation sont déterminées par l'équation suivante:

$$y^2 = h^2 - \frac{2 \times q}{k} \times x \tag{12}$$

Les valeurs de x sont de 0 jusqu'à L (pas moins de 06 valeurs); le calcul est représenté sous forme d'un tableau:

points	x, m	$\frac{2 \times q}{k} x$	y^2	y
1	0	0	80.0	8.95
2	5.0	11.5	68.5	8.28
3	15.0	34.6	45.4	6.74
4	25.0	57.6	22.4	4.72
5	32.0	73.5	6.5	2.55
6	33.58	75.0	5.0	2.24

$$h = \sqrt{\frac{2 \times a_0 \times L}{m_2} + a_0^2} = \sqrt{\frac{2 \times 2.24 \times 33.58}{2.0} + 2.24^2} = 8.95m$$

La vitesse de filtration a la sortie du barrage est déterminée comme suit:

$$v_{sortie} = k \times I_{sortie} = 0.0055 \times 0.0195 = 0.0011m / j = 0.00128m / s ,$$

ou I_{sortie} : pente de la ligne de saturation à la sortie

$$I_{sortie} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_5 - y_6}{x_6 - x_5} = \frac{2.55 - 2.24}{33.6 - 32.0} = 0.0195$$

La verification de la stabilité du matériaux de construction (Terre) sur la diffusion mécanique reside dans la determination de la vitesse de filtration aux points de sortie des eaux de filtration et la comparaison de cette dernière avec la vitesse admissible pour le matériau proposé.

La diffusion a lieu quand $v_{sortie} \leq v_{ffus}$, ou v_{diffus} est la vitesse admissible du matériau du barrage en (m/s), déterminée par l'expression donnée par Grichine:

$$v_{suff} = \sqrt{\frac{k_b}{30}} \tag{13}$$

Dans notre cas k_b (coefficient de filtration du matériau utilisé) = 0.64

$$\text{Donc : } v_{suff} = \sqrt{\frac{k_b}{30}} = \sqrt{\frac{0.64}{30}} = 0.145m / s \text{ et } v_{sortie} = 0.00128m / s < 0.145m / s .$$

Conclusion: la stabilité du barrage est vérifiée.

II. 5.2 Cas d'un barrage en terre sur une fondation imperméable avec drain et en absence de l'eau en aval.

Procédure de calcul : Dans le cas où l'eau est présente dans le coté aval, les équations utilisées sont les suivantes :

$$\frac{q_b}{k_b} = \frac{H_b - d_0 - h}{m_1} \times 2.3 \log \frac{H_b}{H_b - h} \tag{14}$$

$$\frac{q_b}{k_b} = \frac{h^2}{2 \times L} \quad (15)$$

$$L = b_b + (H - h_{dr}) \times m_2 - m_3 \times h_{dr} \quad (16)$$

Où h_{drain} = Hauteur de drain en m.

II.5.3. Cas d'un barrage en terre sur une fondation imperméable avec drain et en présence de l'eau en aval.

Procédure de calcul : Dans le cas où l'eau est présente dans le coté aval, les équations utilisées sont les suivantes :

$$\frac{q_b}{k_b} = \frac{H_b - d_0 - h}{m_1} \times 2.3 \log \frac{H_b}{H_b - h} \quad (17)$$

$$\frac{q_b}{k_b} = \frac{h^2 - h_0^2}{2 \times L} \quad (18)$$

En utilisant le schéma, on peut déduire que la troisième expression s'écrit de la façon suivante :

$$L = b_b + (H - h_{dr}) \times m_2 - m_3 \times a_0 \quad (19)$$

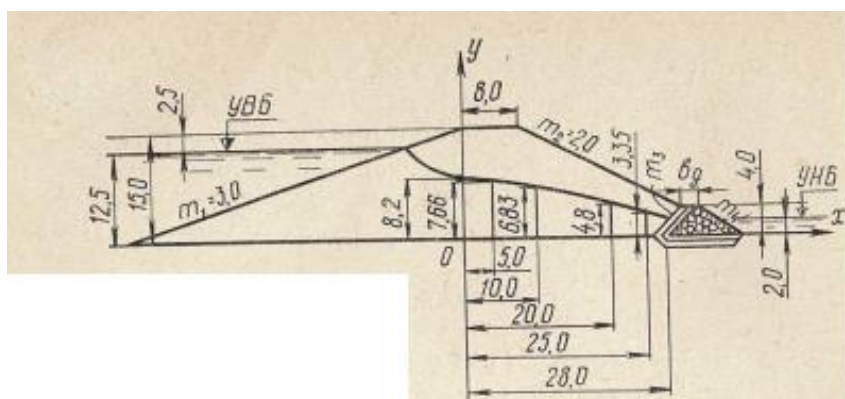


Figure 14. Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage en terre avec fondation imperméable et un drain en aval.

Application 2 :

Construire la ligne de saturation et déterminer le débit spécifique de filtration à travers un barrage en terre sur une fondation perméable et en absence de l'eau à l'aval, si: $H_{bar}=15,0m$; $b_b = 8,0m$, $m_1= 3,0$, $m_2= 2,0$, $m_3=1,0$, $m_4= 1,5$, $d_0= 2,5m$, $k= 0,0055m/j$, $b_{drain}= 2,0m$, $h_{drain}= 4,0m$, $h_0=2,0m$ (voir figure 15).

Solution

- Déterminons en premier lieu la longueur L par l'expression suivante :

$$L = b_b + (H_b - h_{dr}) \times m_2 - m_3 \times a_0 = 8,0 + (15 - 4) \times 2,0 - 2,0 \times 1,0 = 28,0m .$$

- Déterminons la profondeur de filtration du flux h dans des sections séparées de OY. Pour cela, égalisons les deux équations (17) et (18) comme suit :

$$\frac{H_b - d_0 - h}{m_1} \times 2.3 \log \frac{H_b}{H_b - h} = \frac{h^2 - h_0^2}{2L}$$

Après transformation, on trouve:

$$h = \sqrt{\frac{2L}{m_1} (H_b - d_0 - h) 2.3 \lg \frac{H_b}{H_b - h} + h_0^2}$$

- Remplaçons l'expression comme suit : $h = \sqrt{F + h_0^2}$. En donnant des valeurs différentes de h (pas moins de trois valeurs), déterminons $\sqrt{F + h_0^2}$.
- Quand $h = 10$, $\sqrt{F + h_0^2} = 7.25$; $h = 8$, $\sqrt{F + h_0^2} = 8.22$ et $h = 6$, $\sqrt{F + h_0^2} = 8.12$.
- Avec ces valeurs trouvées, on construit un graphe déterminant ainsi la valeur exacte de h . d'après le graphe, $h = 8.20\text{m}$.

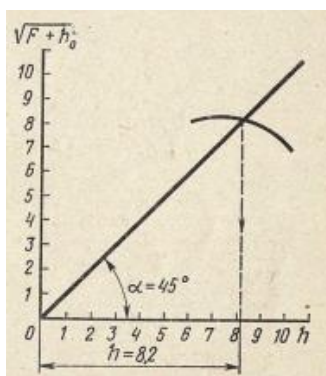


Figure 15. Graphe pour déterminer h .

Maintenant, on détermine le débit spécifique de filtration par la relation (18) :

$$q_b = \frac{h^2 - h_0^2}{2 \times L} \times k_b = \frac{(8.2^2 - 2.0^2)}{2 \times 28} \times 0.0055 = 0.00652 \text{ m}^3 / \text{j}.$$

Les ordonnées de la ligne de saturation sont déterminées par la relation suivante:

$$y^2 = h^2 - \frac{2q_b}{k_b} x.$$

Vérification : Le calcul est présenté dans un tableau récapitulatif. Le calcul est juste si :

✚ Quand $x=L$, implique que $y=h$.

Points	x (m)	$\frac{2q_b}{k_b} x$	y^2	y (m)
1	0	0	70.5	8.4
2	5	11.9	58.6	7.66
3	10	23.7	46.8	6.83
4	20	47.4	23.1	4.8
5	25	59.3	11.2	3.35
6	28	66.4	4.1	2.0

II.5.4. Cas d'un barrage en terre sur une fondation perméable, sans drain et en absence de l'eau en aval.

La solution de cette problématique peut être résolue par deux méthodes différentes proposées par les Professeurs N.N Pavlovsky et R.R Choughev.

✚ Méthode de (N.N Pavlovsky)

L'académicien Pavlovsky propose une méthode simplifiée pour un barrage homogène en terre, avec un coefficient de filtration k_{bar} du barrage et un autre coefficient k_0 pour sa fondation perméable. Le débit spécifique de filtration $q_{spec.total}$ est la somme de deux débits : le débit de filtration à travers le barrage et celui à travers la fondation (sol du barrage).

$$q_{spec.total} = q_b + q_0 \quad (20)$$

✚ Le calcul du débit de filtration à travers le barrage se fait par la méthode précédente. (Voir application 2)

✚ Tandis que le calcul de filtration à travers la fondation est comme suivi (schéma 3) :

$$q_0 = \frac{k_0 \times H_1 \times T}{n \times B_{bar}} \quad (21)$$

Ou, n = coefficient correctif, déterminé comme le rapport $\frac{B_{bar}}{T}$,

T = Epaisseur de la fondation du barrage en metre.

$\frac{B_{bar}}{T}$	20	5	4	3	2	1
n	1.15	1.18	1.23	1.30	1.44	1.87

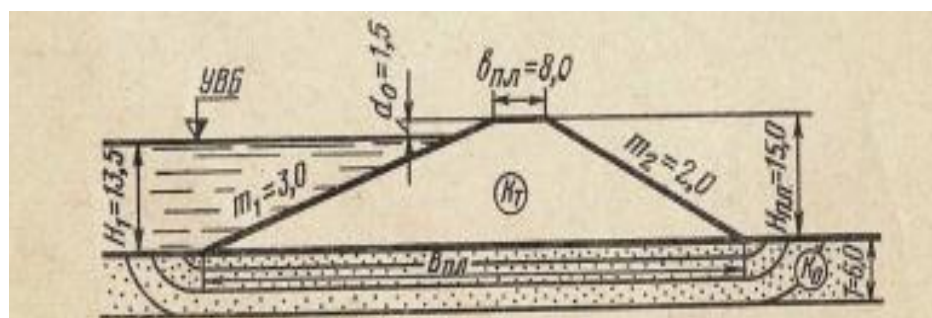


Figure 16. Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage avec fondation perméable. Méthode de Pavlovsky.

Le contrôle de la résistance du sol à la suffusion mécanique consiste à déterminer le débit de filtration aux endroits de sortie des eaux d'infiltration et à le comparer au débit admissible du sol de fond. La suffusion sera absente lorsque $v_{sortie} \leq v_{suff}$, ou v_{suff} est la vitesse admissible du sol en m/s ; déterminée par la formule suivante :

$$v_{suff} = \sqrt{\frac{k_f}{30}} \quad (21)$$

Ou,

k_f = Coefficient de filtration du sol en m/s.

✚ Méthode de (R.R Chougayev)

Désignant par A et B les points extrêmes de la base de la structure. Nous alignons le point A au niveau d'eau en amont et obtenons le point A₁. Du point A₁ et B, respectivement, à gauche nous reportons et à droite nous reporter des segments de 0,44 T de long sur l'horizontale et obtenir les points A₂ et B₁. On relie ces points par une droite et on obtient la ligne piézométrique souhaitée pour la fondation de l'ouvrage AB sous la forme d'une ligne brisée A₁abB.

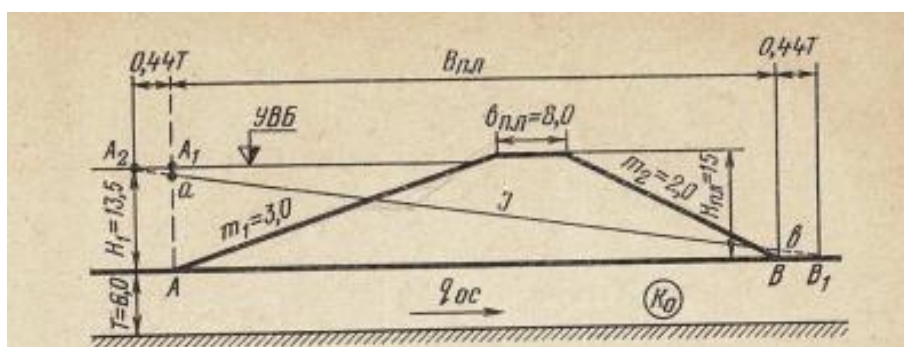


Figure 17. Schéma de calcul d'infiltration à travers un barrage avec fondation perméable. Méthode de Chougayev.

Le débit à travers le barrage lui-même est calcul d'après la méthode citée déjà dans le cas précédent.

Le débit spécifique à travers la fondation du barrage est donné par la relation suivante :

$$q_0 = T \times k_0 \times I = T \times k_0 \times \frac{H_1}{0.44T + B_{bar} + 0.44T} \quad (22)$$

Application 3 :

Déterminer le débit spécifique à travers la fondation d'un barrage en terre homogène si :
 $H_{bar} = 15.0m$; $H_1 = 13.5m$; $b_{bar} = 8.0m$; $d_0 = 1.5m$; $m_1 = 3.0$; $m_2 = 2.0$; $k_0 = 0.5m/j$; $T = 6.0$ m et $h_0 = 0$

Solution :

✚ Méthode de Pavlovsky.

Le débit traversant la fondation q_0 est donné par la relation :

$$q_0 = \frac{k_0 \times H_1 \times T}{n \times B_{bar}} = \frac{0.5 \times 13.5 \times 6}{1.16 \times 83} = 0.422 m^3 / j$$

n est donnée suit au rapport de $\frac{B_{bar}}{T}$; $\frac{B_{bar}}{T} = \frac{83}{6} = 13.84 \longrightarrow n = 1.16$.

✚ Méthode de Choughev.

Le débit traversant la fondation q_0 est donné par la relation :

$$q_0 = T \times k_0 \times I = T \times k_0 \times \frac{H_1}{0.44T + B_{bar} + 0.44T} = 6 \times 0.5 \times \frac{13.5}{88.3} = 0.458 m^3 / j$$

II.5.5. Cas d'un barrage en terre avec un noyau et drain sur une fondation imperméable, et en présence de l'eau en aval.

Calculer un barrage avec noyau et drainage sur une fondation perméable de profondeur finie à $k_{noyau} = k_0$, Gouzov M.Z a proposé de ne pas prendre en compte l'influence sur le débit de filtration de la partie du barrage jusqu'au noyau, qui est très insignifiante, et de considérer le barrage comme constitué de deux ponts du noyau d'épaisseur moyenne et de la partie inférieure du barrage.

Dans ce cas, le calcul converge vers la construction d'une courbe de dépression derrière le noyau et la détermination de la plage de filtration. Pour déterminer la profondeur du flux de filtration, Gouzov a proposé la formule suivante

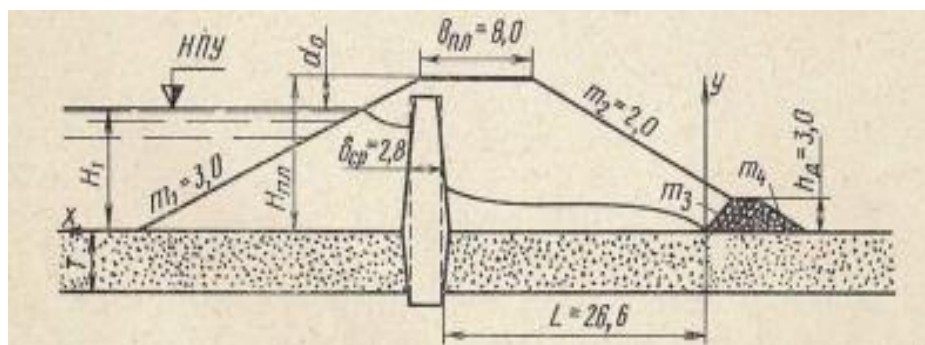


Figure 18. Schéma de calcul d'infiltration d'un barrage en terre avec noyau et drain en aval.

Procédure de calcul

✚ On calcul la hauteur d'eau devant le barrage :

$$h = \sqrt{T^2 + \frac{H_1^2 + 2H_1 \times T}{1 + \frac{k_0}{k_{noyau}} \times \frac{e_{epaisseur}}{L}}} - T \quad (23)$$

Ou, H_1 = hauteur d'eau devant le barrage ;

T = Epaisseur de la fondation en m



- ✚ Connaissant la hauteur h , on peut déterminer le débit spécifique de filtration qui est donné par la relation suivante:

$$q_{\text{spec. filtration}} = k_b \times \frac{(h+T)^2 - T^2}{2L} m^3 / j \quad (24)$$

- ✚ La ligne de saturation ou de dépression se construit par la relation suivante:

$$y = h \sqrt{\frac{x}{L}} \quad (25)$$

N B: L'origine des coordonnées est prise au bas de la pente intérieure du prisme de drainage. (voir figure 8).

Application 4.

Construire la ligne de dépression et déterminer le débit spécifique à travers un barrage en terre homogène avec noyau au centre, drain et en absence de l'eau en aval. (Fig. 8).

Si :

$H_{\text{bar}} = 15.0\text{m}$; $H_1 = 13.5\text{m}$; $b_{\text{bar}} = 8.0\text{m}$; $d_0 = 2.5\text{m}$; $m_1 = 3.0$; $m_2 = 2.0$; $m_3 = 1.0$; $m_4 = 1.5$
 $k_b = 0.5\text{m/j}$; $k_{\text{noyau}} = 0.005\text{m/j}$; $T = 6.0\text{ m}$ (épaisseur du sol) et $h_{\text{drain}} = 3.0\text{m}$.

Solution

D'après la figure 8, déterminons la distance de la face inférieure du noyau moyenné du fond de la pente intérieure du drainage L par la relation suivante :

$$\color{blue}{\oplus} \quad L = b + (H_{\text{bar}} - h_{\text{drain}}) \times m_2 - 0.5 \times e - h_{\text{drain}} \times m_3 = 8.0 + (15.0 - 3.0)2.0 - 0.5 \times 2.8 - 3.0 = 27.6\text{m}$$

$$\color{blue}{\oplus} \quad h = \sqrt{T^2 + \frac{H_1^2 + 2H_1 \times T}{1 + \frac{k_0}{k_{\text{noyau}}} \times \frac{e_{\text{épaisseur}}}{L}}} - T = \sqrt{6^2 + \frac{12.5^2 + 2 \times 12.5 \times 6}{1 + \frac{1.5}{0.005} + \frac{2.8}{27.6}}} - 6.0 = 0.8\text{m}$$

- ✚ La ligne de dépression est construite par la relation :

$$y = h \sqrt{\frac{x}{L}}$$

Dressons un tableau pour déterminer les coordonnées de la ligne construite :

x	1	5	10	15	20	27.5
y	0.157	0.34	0.43	0.59	0.68	0.8

- En dernier lieu, nous déterminons le débit de filtration par la relation suivante :

$$q_{\text{spec. filtration}} = k_b \times \frac{(h+T)^2 - T^2}{2L} = 1.5 \times \frac{(0.8 + 6.0)^2}{2 \times 27.6} = 0.27\text{m}^3 / j.$$

II.5.6. Cas d'un barrage avec masque et sans drain sur une fondation imperméable et en présence de l'eau en aval.

Procédure de calcul :

Le calcul d'infiltration à travers ce type de barrage, en présence de l'eau se fait de la manière suivante :

$$\frac{q_b}{k_b} = \frac{H_1^2 - h_e^2 - z^2}{2 \times e_{moy} \times n \times \sin \vartheta} \quad (26)$$

$$h_1 - h_0 = \frac{L}{m_2} - \sqrt{\frac{L}{m_2} - (h_e - h_0)^2} \quad (27)$$

$$\frac{q_b}{k_b} = \frac{h_e^2 - h_1^2}{2(L - m_2 \times h_1)} \quad (28)$$

Application 5.

Construire la ligne de dépression et déterminer le débit spécifique à travers un barrage en terre homogène avec masque et en présence de l'eau en aval. (Fig. 9).

Si :

$H_{\text{bar}} = 15.0\text{m}$; $H_1 = 12.5\text{m}$; $b_{\text{bar}} = 8.0\text{m}$; $d_0 = 2.5\text{m}$; $m_1 = 3.0$; $m_2 = 2.0$; $h_0 = 1.0\text{m}$; $k_b = 0.5\text{m/j}$;
 $d_0 = 2.5\text{m}$; $k_{\text{noyau}} = 0.005\text{m/j}$; $\theta = 18^\circ 30'$; $\sin 18^\circ 30' = 0.32$; $\cos 18^\circ 30' = 0.95$; $e_{\text{moy}} = 0.5(1.0 + 2.0) = 1.5\text{m}$;

$z = \text{projection de l'épaisseur du masque sur la verticale} = e_{\text{moy}} \times \cos \theta = 1.5 \times 0.95 = 1.42\text{m}$;

$$n = \frac{k_b}{k_{\text{masque}}} = \frac{0.5}{0.005} = 100.$$

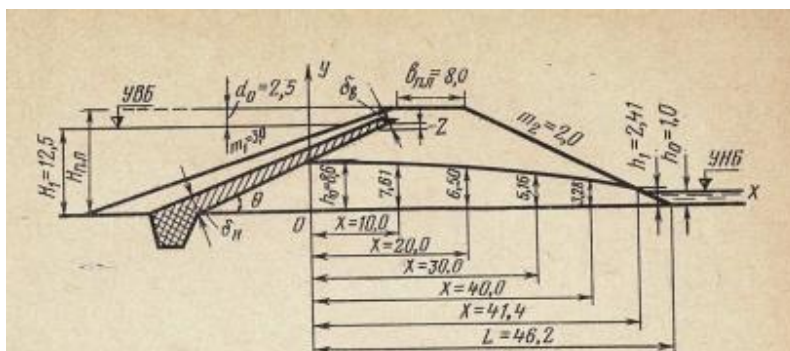


Figure 19. Schéma de calcul d'infiltration d'un barrage en terre avec écran et une fondation imperméable.

Solution

- En donnant des valeurs différentes de h_{masque} (pas moins de trois valeurs).

$$h_{\text{masque}} = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ m}$$

- Déterminons la distance de bas du barrage (voir fig.9)

$$L = (H_b - h_{\text{epais}}) \times m_1 + b_b + m_2 \times H_b - \frac{e_{\text{moy}} + t_{\text{protection}}}{\sin \vartheta} \quad (29)$$

- L'ordonnée de la ligne de dépression h_l est déterminé par la relation (27).
- Désignant l'expression (26) par $\frac{q_b}{k_b} = F_1(h_{\text{epaisseur}})$ et la relation (28) par $\frac{q_b}{k_b} = F_2(h_{\text{epaisseur}})$, et déterminons leurs valeurs. Le calcul est présenté sous forme du tableau suivant:

$h_{\text{epaisseur}}, \text{ m}$	$L, \text{ m}$	$h_1, \text{ m}$	$F_1(h_e)$	$F_2(h_e)$
10.0	42.0	3.0	0.57	1.26
8.0	48.0	2.0	0.94	0.68
6.0	54.0	1.4	1.24	0.33
4.0	60.0	1.2	1.45	0.126
2.0	66.0	1.0	1.57	0.022
$h_e=8.6$	46.2	2.4	0.82	0.80

D'après le tableau, on remarque que pour la valeur de $h=8.6\text{m}$, $F_1(h_{\text{masque}}) \approx F_2(h_{\text{masque}})$.

- ✚ Déterminons, maintenant le débit spécifique d'infiltration par la relation (28) :

$$q_b = k_b \times \frac{h_e^2 - h_1^2}{2(L - m_2 \times h_1)} = 0.5 \times \frac{(8.6^2 - 2.4^2)}{2(46.2 - 2 \times 2.4)} = 0.395 \text{ m}^3 / j.$$

- ✚ Les ordonnées (x, y) de la ligne de dépression sont déterminés par la relation :

$$y^2 = h_2^2 - \frac{2 \times q_b}{k_b} x$$

Le calcul est présenté sous forme d'un tableau :

$x, \text{ m}$	0	10.0	20.0	30.0	40.0	41.40
$\frac{2 \times q_b}{k_b} x$	0	15.8	31.6	47.4	63.20	68.70
y^2	74	58.20	42.40	26.60	10.80	5.30
$y, \text{ m}$	8.60	7.64	6.50	5.16	3.28	2.41

Tableau 3. Résultats de calcul des ordonnées de la ligne de dépression.

L'exactitude des calculs de filtration est confirmée si :

- ✚ Quand $x=L-m_2h_1$; $y= h$, ce qui prouve que $x = 46.2-2 \times 2.4=41.4\text{m} \rightarrow y=h=2.4 \text{ m}$

- ✚ La vitesse de filtration a la sortie du barrage est déterminée comme suit:

$$v_{\text{sortie}} = k \times I_{\text{sortie}} = 0.55 \times 0.62 = 0.31 \text{ m} / j, \text{ ou } I_{\text{sortie}}: \text{ pente de la ligne de saturation à la}$$

$$\text{sortie } I_{\text{sortie}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_5 - y_6}{x_6 - x_5} = \frac{3.28 - 2.41}{41.4 - 40.0} = \frac{0.87}{1.4} = 0.62 < I_{\text{admissible}} = 0.75.$$

II.5.7. Cas d'un barrage avec masque, avec drain sur une fondation imperméable et en absence de l'eau en aval.

Procédure de calcul :

Le calcul d'infiltration à travers ce type de barrage, en présence de l'eau se fait de la manière suivante :

$$\frac{q_b}{k_b} = \frac{H_1^2 - h_{e_e}^2 - z^2}{2 \times e_{moy} \times n \times \sin \theta} \quad (30)$$

$$\frac{q_b}{k_b} = \frac{h_e^2}{2 \times L_{drain}} \quad (31)$$

Ou : $z = e_{moy} \times \cos \theta$ et $n = \frac{k_b}{k_{masque}}$

$$L = (H_b - h_{epaiss}) \times m_1 + b_b + m_2 \times (H_b - h_{drain}) - m_3 \times h_{drain} + \delta - \frac{e_{moy} + t_{protection}}{\sin \theta} \quad (32)$$

Ou δ = valeur d'entrée de la courbe de dépression dans le prisme de drainage : $\delta = 0.055 H$ (voir figure 10).

Le calcul de la courbe de dépression est donné par la relation :

$$y^2 = \frac{h_e^2}{L_{drain}} x \cdot$$

Application 6.

Construire la ligne de dépression et déterminer le débit spécifique à travers un barrage en terre homogène avec masque, drain et en absence de l'eau en aval. (Fig. 22).

Si :

$H_{bar} = 15.0m$; $H_1 = 12.5m$; $b_{bar} = 8.0m$; $d_0 = 2.5m$; $m_1 = 3.0$; $m_2 = 2.0$; $h_0 = 3.0m$, $b_{drain} = 1.0m$; $k_b = 0.5m/j$; $d_0 = 2.5m$; $m_3 = 1.0$; $m_4 = 1.5$; $k_{masque} = 0.005m/j$; $\theta = 18^\circ 30'$; $\sin 18^\circ 30' = 0.32$; $\cos 18^\circ 30' = 0.95$; $e_{moy} = 0.5(1.0 + 3.0) = 2.0m$; $\delta = 0.005 H_1 = 0.005 \times 12.5 = 0.7m$;

$z = \text{projection de l'épaisseur du masque sur la verticale} = e_{moy} \times \cos \theta = 2 \times 0.95 = 1.9m$;

$$n = \frac{k_b}{k_{masque}} = \frac{0.5}{0.005} = 100.$$

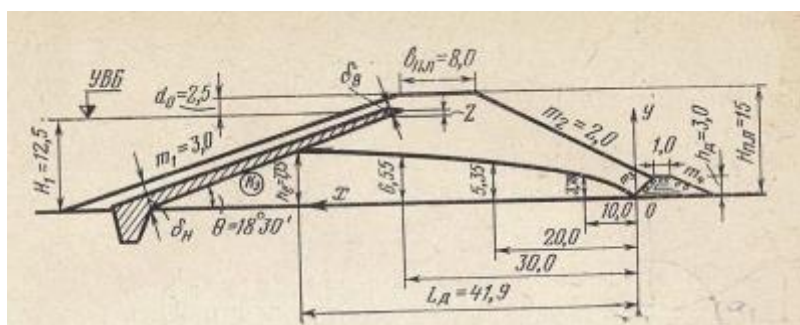


Figure 20. Schéma de calcul d'infiltration d'un barrage en terre avec écran et une fondation imperméable et un drain en aval.

Solution

1. Donnons trois valeurs pour h_{masque} et déterminons la largeur de drain par la relation (32).

2. Désignant la relation (30) par $\frac{q_b}{k_b} = F_1(h_{\text{épaisseur}})$ et la relation (31) par $\frac{q_b}{k_b} = F_2(h_{\text{épaisseur}})$,

et déterminons leurs valeurs. Le calcul est présenté sous forme du tableau suivant:

h_{drain}, m	L_{drain}, m	$F_1(h_{\text{masque}})$	$F_2(h_{\text{masque}})$
10.0	34.15	1.46	0.41
6.0	47.15	0.38	0.915
3.0	56.15	0.08	1.12
$h_e=7.75$	41.90	0.74	0.74

3. D'après le tableau, on remarque que pour la valeur de $h=7.75$ m, $F_1(h_{\text{masque}}) \approx F_2(h_{\text{masque}})$.

D'après la valeur trouvée requise de h_{masque} , on détermine la valeur de L_{drain} correspondante puisque $F_1(h_{\text{masque}}) = F_2(h_{\text{masque}})$.

4. Déterminons maintenant la valeur de L_{drain} par la relation (32) :

$$L = (H_b - h_{\text{masque}}) \times m_1 + b_b + m_2 \times (H_b - h_{\text{drain}}) - m_3 \times h_{\text{drain}} + \delta - \frac{e_{\text{moy}} + t_{\text{protection}}}{\sin \vartheta} =$$

$$(15.0 - 7.75) \times 3.0 + 8.0 + 2.0(15.0 - 3.0) - 1.0 \times 3.0 + 0.7 - \frac{2.0 + 1.0}{0.32} = 41.9m$$

5. Trouvons par la relation (31) le débit spécifique d'infiltration à travers le barrage:

$$q_b = k_b \times \frac{h_e^2}{2 \times L_{\text{drain}}} = 0.5 \frac{7.75^2}{2 \times 41.9} = 0.358 m^3/j$$

6. déterminons, les coordonnées de la ligne de saturation par la relation $y^2 = \frac{h_e^2}{L_{\text{drain}}} x$

En sachant que le calcul est exact si: Quand $h_{\text{masque}} = 7.75$ m ; $L_{\text{drain}} = 41.9$ m, la ligne prend la forme de $y^2 = 1.43x$.

Le calcul est donné dans le tableau suivant :

x, m	0	10	20	30	41.9
y²	0	14.3	28.6	42.9	60.0
y, m	0	3.78	5.35	6.55	7.75

Vérification : Le calcul est vérifié parce que quand $x=L_{\text{drain}}=41.9$ m, $y=h_{\text{masque}}=7.75$ m.

Chapitre III. Prévention contre le phénomène de renard.

III.1. Phénomène de renard.

III.1.1. Description

La circulation d'eau d'infiltration au sein du barrage et de ses fondations peut mettre en danger la stabilité de l'ouvrage en amorçant un phénomène dont le processus est le suivant :

L'eau peut atteindre en certains endroits des vitesses élevées provoquant un entrainement de fines particules du sol ; localement, le sol se trouve donc plus perméable, augmentant ainsi la vitesse de filtration.

Des éléments plus gros peuvent être aussi entraînés à leur tour provoquant ainsi une érosion progressive le long d'une ligne de courant. La longueur parcourue de l'eau diminue, ce qui contribue à l'augmentation davantage du gradient hydraulique, et donc la vitesse. Ce phénomène, à cause de sa ressemblance avec le creusement d'un terrier, est connu sous le nom de « renard ».

Le phénomène d'arrachement comme la boulangerie est susceptible d'être accompagné d'un transport important des grains, déstabilisant les sols. Le phénomène de renard apparaît dans des écoulements en milieu perméable comme les barrages ou digues en terre, dans la direction d'écoulement de l'amont vers l'aval. Localement les vitesses d'écoulement augmentant peuvent atteindre le seuil d'entraînement des grains fins qui progressivement va « raviner » les lignes de courant de l'intérieur. Les éléments plus importants vont alors être entraînés, l'érosion progresse de manière régressive le long d'une ligne de courant, formant un conduit où s'engouffre l'eau de manière irréversible.

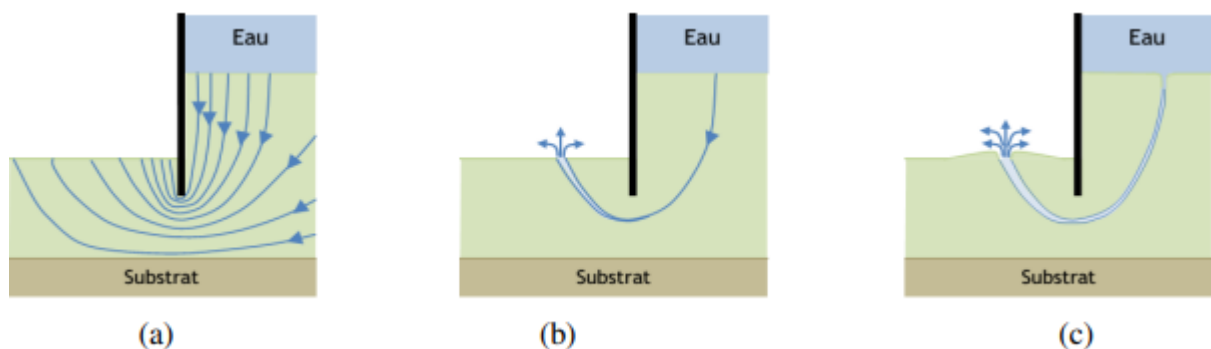


Figure 21. Illustration du phénomène de renard dans une retenue d'eau par rideau palplanche
 a) Réseau d'écoulement sans perturbation, b) érosion interne en début du phénomène,
 c) Renard hydraulique développé, rupture proche.

Dans le cas de l'infrastructure, l'érosion régressive sous l'ouvrage ; conduit à la formation d'un véritable tunnel, d'aval en amont (Fig. 12). Sous le poids du barrage, le sol de fondation venant à manquer, il se produit un tassement ou, mieux, un affaissement de l'ouvrage. Par conséquent, lorsque le réservoir est plein, le plan d'eau passe par-dessus du couronnement : c'est la submersion qui provoque la ruine.

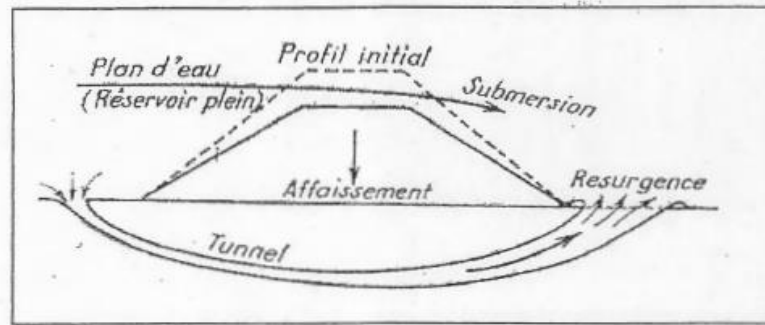


Figure 22. Affaissement et submersion d'un barrage en terre mince par un renard.

Dans le cas de l'infrastructure, l'érosion régressive sous l'ouvrage ; conduit à la formation d'un véritable tunnel, d'aval en amont (Fig. 9). Sous le poids du barrage, le sol de fondation venant à manquer, il se produit un tassement ou, mieux, un affaissement de l'ouvrage.

Par conséquent, lorsque le réservoir est plein, le plan d'eau passe par-dessus du couronnement : c'est la submersion qui provoque la ruine.

Si le phénomène de renard se produit en superstructure, les filets d'eau, qui émergent vers la partie basse du talus, minent l'ouvrage par le pied et si l'on n'y prend garde un éboulement se produit, comme dans le cas précédent, la ruine du barrage est inévitable.

III.2. Moyens de réduction du risque d'érosion interne (phénomène de renard).

La méthode la plus efficace est la prévention. En effet, quand le phénomène a commencé, il est très difficile de le stopper. Pour éviter tout risque de renard, il faut que le gradient hydraulique reste suffisamment faible : $I = \frac{H}{L_1} \geq I_{cr}$. Pour réduire les risques, il faut soit diminuer H, soit augmenter L.

La plupart des phénomènes d'érosion interne ont une origine accidentelle, qui ensuite occasionne une augmentation du gradient hydraulique i . Celle-ci peut advenir lors d'une augmentation de la charge H (période de crue, rehausse majeure du seuil déversant...) ou via une diminution de la longueur d'écoulement de l'eau à travers les grains.

La diminution de la Phénomène d'érosion dans le sol 43 longueur d'écoulement peut être due à plusieurs aléas comme la rupture d'une conduite de vidange, les changements de sol par fissuration ou retrait, l'amorce par terriers animaux ou encore des vides préexistants (défaut de construction). Quelle qu'en soit la raison, il en résulte une modification des conditions d'écoulement avec diminution de la longueur d'écoulement, augmentation du gradient hydraulique et des vitesses d'écoulement. La bouillasse se remarque sous eau (par une zone plus ou moins étendue) de turbidité de l'eau c'est-à-dire la présence de grains du sol en suspension. On rappelle que si le gradient hydraulique tend à devenir supérieur au gradient critique, il y a entraînement des grains vers le haut [Desodt 2016].

L'apparition de ce phénomène de boulangerie peut être soudaine et la cause de grands dommages à l'aval d'un barrage, sa venue entraîne une perte de portance de la zone aval de la fondation. Une fois le phénomène amorcé, les moyens mis en œuvre pour le stopper sont considérables. Le déversement de matières perméables (comme du gravier) sur la zone où la boulangerie apparaît, permet parfois d'enrayer cet événement. La longueur de l'écoulement est directement liée au gradient hydraulique. Un des moyens de se prémunir de l'érosion interne par renard est d'augmenter la longueur de l'écoulement, diminuant les gradients hydrauliques et éloignant les risques d'atteindre une valeur critique du gradient hydraulique.

Plusieurs dispositifs sont susceptibles d'être mis en œuvre (figure 13). Parmi eux, on cite :

- ✚ En amont, le pied du barrage est éloigné par un tapis de matériaux imperméables,
- ✚ Sous le barrage, des barrières verticales étanches détournent l'écoulement,
- ✚ En aval, le tapis drainant et un filtre maintiennent les grains, une recharge pèse et empêche le soulèvement des grains.
- ✚ Toujours en aval, un puits de décharge permet une mise à la pression atmosphérique de la couche perméable annulant les éventuels forts gradients.

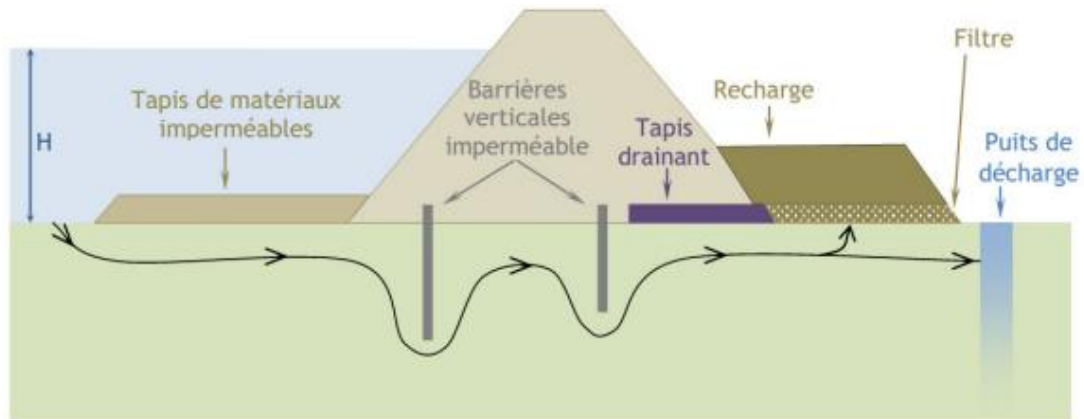


Figure 23. Dispositifs de réduction du risque d'érosion interne.

Les deux premiers dispositifs (figure 13) sont destinés à allonger le chemin d'écoulement, permettant de diminuer le gradient hydraulique et le débit de l'écoulement. Les dispositifs en aval limitent les soulèvements du sol, le puits supprime les gradients encore trop forts.

III.3. Etanchéité de la digue et des fondations des barrages en terre.

III.3.1. Introduction :

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

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

III.3.2. Rôles des drains et des filtres des barrages en terre

Du fait de la charge à l'amont du barrage, l'eau s'infiltré progressivement dans le massif du barrage et dans sa fondation, bien que le choix des matériaux de construction a été fait de manière à imiter les débits de filtration. Si la ligne de saturation est relativement haute, le courant de filtration peut sortir au parement aval, la plupart du corps du barrage est saturée, l'angle de frottement externe du sol ϕ s'abaisse, la stabilité des talus diminue.

Pour abaisser la ligne de saturation, on doit prévoir à l'intérieur du massif du barrage et éventuellement dans la fondation de celui-ci un dispositif drainant pour évacuer des eaux de filtration. Ce dispositif est, en général, composé de drains et de filtres.

III.3.3. Drains et filtres

Un drain est organe qui évacue les eaux provenant d'une filtration à travers le massif du barrage.

- ✚ Les drains sont constitués de graviers perméables, de tuyaux en béton poreux ou en plastique perforé et entourés de graviers.
- ✚ Le filtre est constitué de couches successives de matériaux perméables, de granulométrie de plus en plus fines assurant la transition entre le drain et les éléments fins des terres drainées.

Dans un filtre, chaque couche doit jouer le rôle de filtre vis-à-vis de la précédente couche dans le sens de l'écoulement de l'eau. Un filtre ne doit ni se dégrader par entrainement de ces éléments, ni se colmater. Pour cela, on utilise des matériaux dont le coefficient d'uniformité $D_{60}/D_{10} < 2$ pour une couche, et $D/d < 10$ pour deux couches juxtaposées (D, d sont les diamètres moyens des grands grains et petits grains de deux couches juxtaposées).

L'épaisseur de chaque couche doit être au moins de 20 à 30 cm et en tous les cas supérieur ou égale à 50 fois de diamètre D_{15} .

III.3.4. Types des drains et filtres dans un barrage en terre.

III.3.4.1. Drain tapis : C'est un drain tapis filtrant destiné à rabattre la ligne phréatique à l'intérieur du massif et intercepter les infiltrations à travers une fondation perméable ; il s'étend sur 1/4 à 1/3 de l'emprise du barrage ;

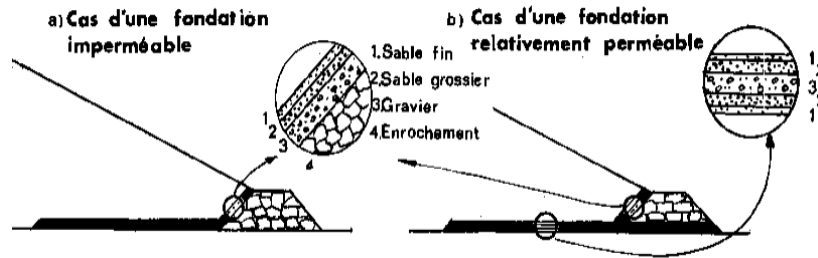


Figure 24. Drain tapis filtrant

III.3.4.2. Drain Vertical : C'est un drain placé au centre (solution plus efficace), sa largeur minimale 1m. Peut remonter jusqu'à la côte moyenne du plan d'eau amont. L'eau interceptée est évacuée par un réseau tuyaux-drains ou par un drain-tapis filtrant (si la fondation est perméable)

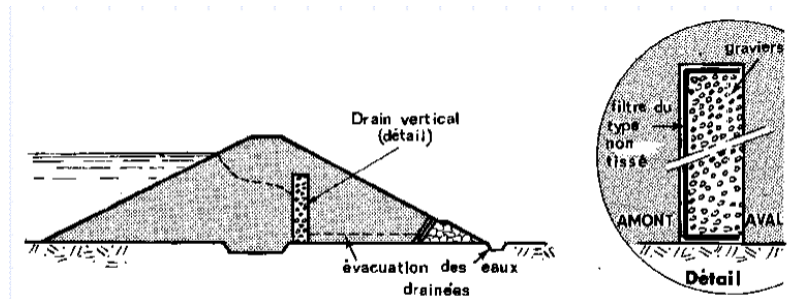


Figure 25. Drain vertical

III.3.4.3. Puits filtrants : cas de fondation perméable et hétérogène. Il est utilisé pour assurer le drainage et éliminer les sous-pressions. Le nombre de ce filtre est déterminé en fonction de l'hétérogénéité et profondeur dépassant 50% la hauteur du barrage

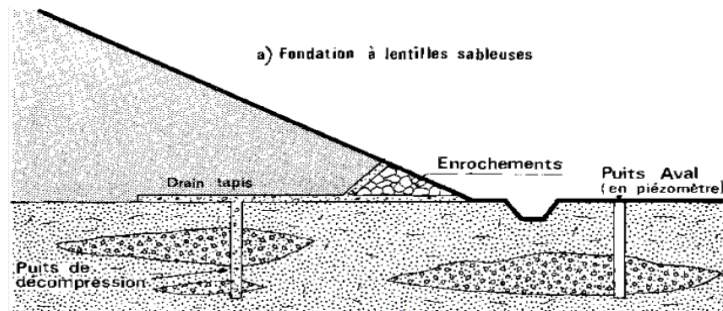


Figure 26. Puits filtrant

III.3.4.4. Organes d'étanchéité du barrage :

- 1. Noyau argileux compacté :** Il est constitué de mélange d'argile, sables et graviers en proportions convenables. Pour la protection contre la dessiccation et les fissures dans sa partie supérieure, il faut une mise en place de couche de sable ou de préférence traitement avec une couche en enrobé bitumineux. Le noyau devra être monté au-

dessus des PHE (jusqu'à la crête du barrage pour tenir compte des remontées capillaires).

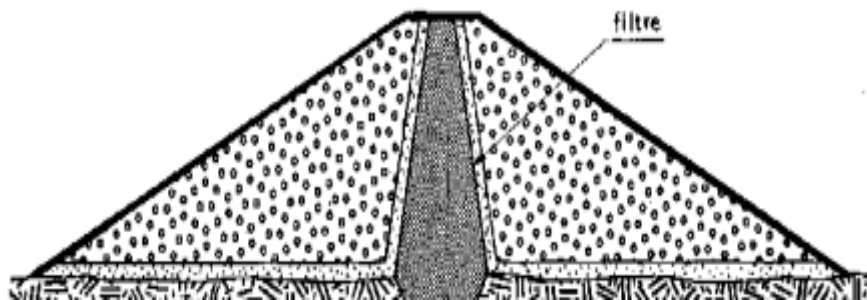


Figure 27. Barrage avec un noyau argileux compacté

- 2. Parois moulée :** Cette est constituée de béton d'argile pour assurer une plasticité vis-à-vis des déformations du remblai. Après réalisation de la tranchée mise en place de boue bentonitique puis chargement en ciment.

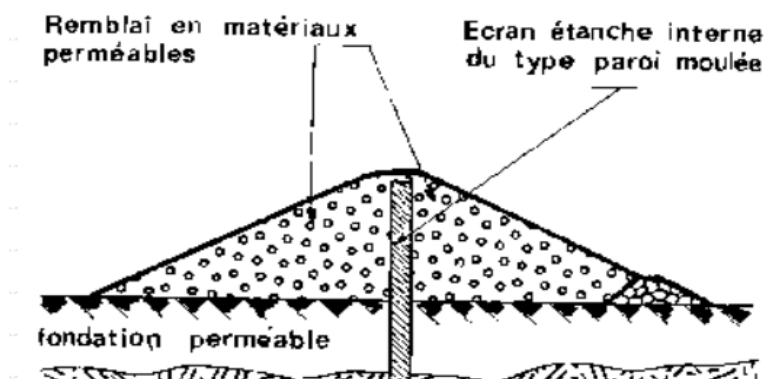


Figure 28. Masque amont avec fondation perméable

- 3. Masque en béton de ciment :** Ces masques généralement ne conviennent pas aux barrages en terre (relativement souples), ils sont destinés pour des barrages en enrochement. Très sensible aux agressions extérieures, notamment l'eau. Le masque en béton bitumineux : très étanche et suffisamment élastique et plastique pour suivre les déformations du massif.

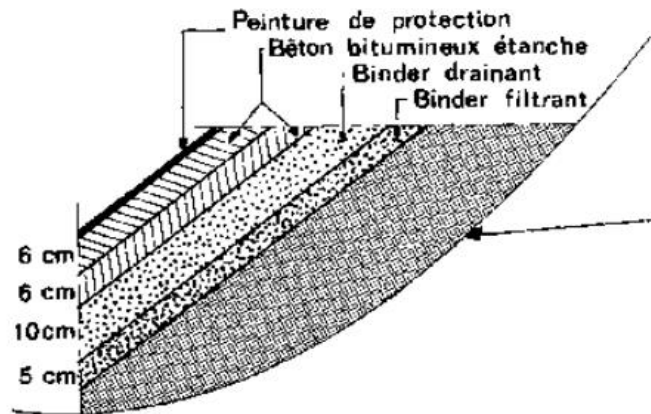


Figure 29. Masque en béton de ciment

4. **Ecran vertical** : La tranchée est remplie de matériaux argileux compacté sous le massif du barrage en prolongement du noyau. La Parois moulée en béton d'argile dans le prolongement de l'organe d'étanchéité du barrage et les rideaux d'étanchéité sont réalisés par injection de ciment

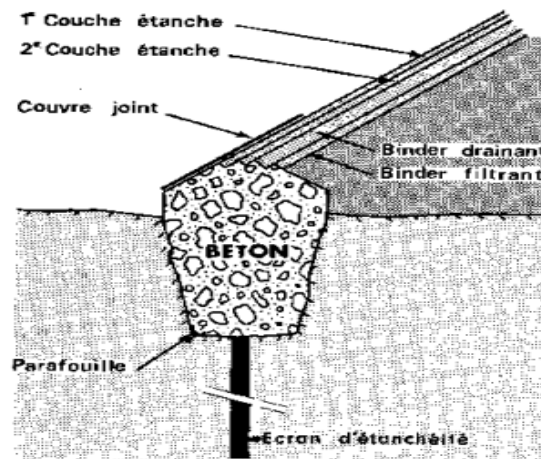


Figure 30. Ecran vertical

5. **Tapis étanche** : Pour diminuer les fuites, on utilise ces tapis en les allongeant vers l'amont les lignes d'infiltration. Ils sont constitués de matériaux argileux compactés (pour renforcer l'étanchéité par des polymères synthétiques) et de bentonite (pour améliorer la continuité et l'efficacité).

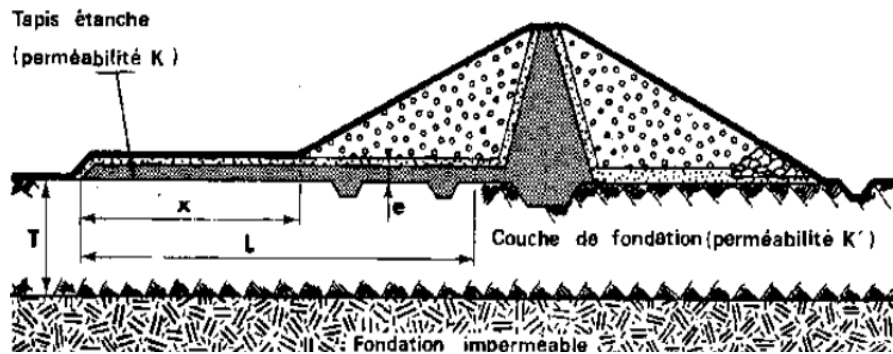


Figure 31. Ecran étanche rempli de matériaux argileux

III.3.4.5. Protection des talus

1. **Talus amont** : pour la protection des talus amont contre l'attaque des vagues, on utilise des enrochements, des revêtements perméables (béton bitumineux, dalles de béton préfabriquées...) ou traitement au ciment.

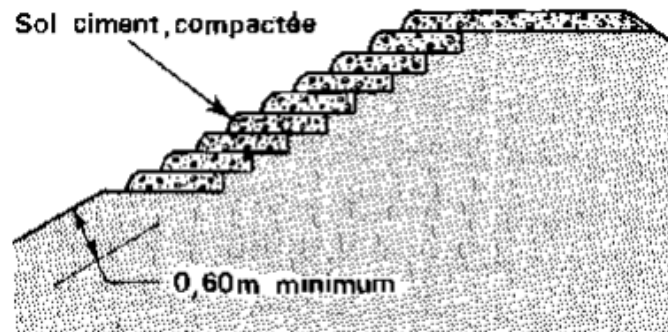


Figure 32. Protection du talus amont contre les vagues.

2. **Talus Aval** : Pour la protection du talus aval contre l'érosion due au ruissellement des eaux de pluies, on procède à plusieurs méthodes, parmi eux, on cite :
 - ✚ L'enherbement en cas de petit barrage ;
 - ✚ Risbermes ou fossés parallèles à la ligne de crête qui intercepteront les eaux avant d'atteindre le pied avec de grande vitesses
 - ✚ Pour Protection contre le renard dû au ressuyage des eaux de saturation avec un dispositif de drainage.

Chapitre IV. Etude de stabilité des barrages en terre.

IV.1. Introduction

L'étude de la stabilité des barrages en terre est celle de la stabilité de son talus amont et celle son talus aval sur la fondation. Il n'existe pas de méthodes globale permettant de calculer la stabilité d'un tel système sans faire d'hypothèse. On est obligé de se donner une forme de la surface de rupture au contact à laquelle il peut y avoir un glissement.

A partir de cette hypothèse, on découpe le terrain en tranches verticales de faibles épaisseur juxtaposées et on étudie l'équilibre de l'ensemble, à la limite du glissement. Le barrage et sa fondation sont formés de terres dont la résistance au cisaillement t est fonction de la contrainte normale n , de la pression interstitielle p et des deux caractéristiques cohésion c et angle de frottement φ selon la relation (Loi de Coulomb) :

$$t = c + (n - p) \times \operatorname{tg} \varphi \quad (33)$$

Il existe plusieurs méthodes de calcul suivant la nature des hypothèses faites sur les interactions entre tranches et sur la pression interstitielle.

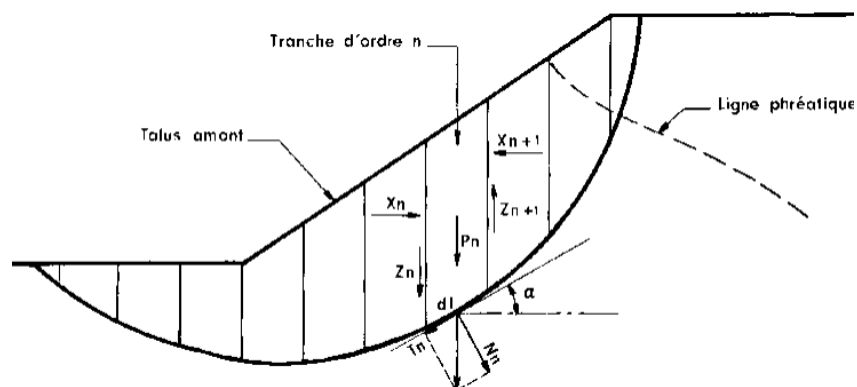


Figure 22 : Calcul de stabilité : méthode des tranches

Soient :

- ✚ dl est la position de cercle de glissement interceptée par la tranche d'ordre n considérée ;
- ✚ x_n est la longueur de l'arc de cercle situé dans la partie saturée, c'est-à-dire sous la ligne phréatique ;
- ✚ N_n est la composante normale et T_n est la composante tangentielle du poids P_n de la tranche ramenée au niveau du cercle de glissement ;
- ✚ X_n et Z_n sont les composantes de l'action de la tranche d'ordre $n-1$ sur la tranche d'ordre n ;
- ✚ X_{n+1} et Z_{n+1} sont les composantes de l'action de la tranche d'ordre $n+1$ sur la tranche d'ordre n .

IV.2. Méthode de Fellenius.

Pour simplifier les calculs, Fellenius admet les hypothèses suivantes :

- 1) Au niveau de chaque tranche :
 $X_{n+1} - X_n = 0$ et $Z_{n+1} - Z_n = 0$, ce qui signifie qu'il n'y a pas interaction.
- 2) La force tangentielle T a tendance à entraîner le glissement ; elle est motrice. T_n est la composante tangentielle du poids de toute la matière contenue dans la tranche n , sol et eau.
- 3) La force N est stabilisatrice car elle mobilise le frottement interne ; elle crée une force résistante $N \operatorname{tg} \varphi$ opposée à T . N est donc la composante normale du poids immergé, c'est-à-dire le poids calculé à partir de la densité saturée diminuée de 1. Appelons-la N'
- 4) Soit R le rayon du cercle de glissement.
- 5) Le moment des forces résistantes est la somme de celui des forces de frottement et celles de cohésion :

$$\sum (N' \times \operatorname{tg} \varphi) \times R + \sum (c \times dl) \times R = (\sum N \times \operatorname{tg} \varphi + c \times l) \times R \quad (34)$$

- 6) Le moment des forces motrices s'écrit :

$$\sum T \times R = R \sum T \quad (35)$$

Le coefficient de sécurité f est défini comme le rapport du moment résistant au moment moteur :

$$f = \frac{\sum N' \times \operatorname{tg} \varphi + c \times l}{\sum T} \quad (36)$$

Remarque importante :

Une variante plus élaborée de la méthode de Fellenius consiste à tenir en compte de la pression interstitielle (Méthode de Bishop). On prend alors pour N la composante normale du poids total calculé à partir de la densité saturée engendrant sur dl une pression totale moyenne N/dl de laquelle il faut déduire la pression interstitielle p régnant dans cette zone.

Cette méthode est plus précise que celle de Fellenius, mais elle nécessite trois à quatre fois plus de calcul (obligation d'opérer trois à quatre itérations).

La force de frottement mobilisée le long de dl est alors :

$$\left(\frac{N}{dl} - p \right) \times \operatorname{tg} \varphi \times dl = (N - p \times dl) \times \operatorname{tg} \varphi \quad (37)$$

✚ Le moment des forces résistantes s'écrit :

$$\sum (N - p \times dl) \times \operatorname{tg} \varphi \times R + \sum (c \times dl) \times R = R [\sum (N - p \times dl) \times \operatorname{tg} \varphi + c \times l] \quad (38)$$

✚ Le moment des forces motrices s'écrit comme suit :

$$\sum T \times R = R \sum T \quad (39)$$

✚ Le coefficient de sécurité s'écrit alors :

$$f = \frac{\sum (N - p \times dl) \times \operatorname{tg} \varphi + c \times l}{\sum T} \quad (40)$$

IV.3. Calcul sur ordinateur

Le calcul de stabilité d'un barrage en terre peut se faire sur machine électronique par des logiciels tels que :

- ✚ Le logiciel PLAXIS qui est un programme de calcul en éléments finis spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformations ou de stabilités pour différents types d'applications géotechniques.

Scientifiquement parlant, le code PLAXIS est un outil d'analyses non linéaire en élasto-plasticité non standard, avec prise en compte des pressions interstitielles. L'ensemble des options par défaut (conditions aux limites) rend la mise des données aisée et rapide, et enfin, les options simplifiées permettant d'aller droit au but (prévoir le comportement de l'ouvrage).

Le calcul sur ordinateur permet aussi d'obtenir une valeur du coefficient de sécurité très proche de la valeur minimale effective et de déterminer le réseau d'infiltration en tenant compte des pressions interstitielles.

- ✚ Le logiciel Geostudio

C'est un logiciel de calcul géotechnique qui permet de traiter les différents problèmes du sol comme le glissement des terrains, le tassement, la consolidation, les infiltrations des eaux

dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique.

Plusieurs programmes sont intégrés dans la fenêtre générale du logiciel :

- ✚ SLOPE/W : Permet de calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques.
- ✚ SEEP/W : Permet de calculer les infiltrations des eaux (Par la méthode des éléments finis).
- ✚ SIGMA/W : Permet d'analyser les problèmes de la relation contraintes / déformations (Par la méthode des éléments finis).
- ✚ QUAKE/W : Permet de définir le comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme (Par la méthode des éléments finis).
- ✚ TEMP/W : Permet d'analyser les problèmes Géothermique du sol (Par la méthode des éléments finis) ... et autres logiciels.

Chapitre IV. Sélection des matériaux et méthodes de construction.

V.1. Introduction

Les barrages en remblai de terre ont la grande qualité de s'accommoder de fondations meubles qui seraient incapables de supporter un ouvrage en béton ; cela permet d'équiper les sites dont le fond de vallée est garni, éventuellement sur de fortes épaisseurs (100 m ou plus), d'alluvions ou de roches décomposées, déformables et plus ou moins perméables. En première approche, une bonne règle générale est que la fondation d'un barrage doit disposer des propriétés, naturelles ou obtenues par traitement, au moins équivalentes à celles du corps du barrage qu'elles doivent recevoir. Ils constituent donc une bonne solution lorsque des matériaux de qualité convenable sont disponible à proximité immédiate.

V.2. Sélection des matériaux

Toute la conception d'un barrage en terre vise à satisfaire, en ayant recours aux matériaux naturels disponibles à proximité (les seuls économiquement disponibles en très grande quantité), les conditions de stabilité qui dépendent fortement de deux aspects essentiels : — le contrôle des pressions interstitielles à l'intérieur du remblai, dont on sait qu'elles influent fortement sur la stabilité statique du remblai lui-même, dès la période de construction. — le contrôle des circulations d'eau à l'intérieur du remblai, où elles risquent de provoquer des érosions internes, peut-être encore plus dangereuses que les pressions, car les effets en sont souvent peu visibles jusqu'à la ruine.

Ces dernières fonctions sont assurées par des matériaux naturels de type « sol » judicieusement organisés. Leur défaut essentiel est une très grande vulnérabilité au déversement par-dessus leur crête, la ruine survenant très rapidement par érosion superficielle et interne de leur partie aval.

Il convient donc de dimensionner très largement les organes de protection contre les crues qui leur sont associés, et d'être très prudents lorsqu'on n'est pas sûr des données hydrologiques en matière de crues.

Le terme « terre » couvre donc toute une gamme de matériaux allant de l'argile pure très fine à des éléments très grossiers. Dans certains cas même, on utilise des roches altérées facilement compactées, tels que des latérites, des schistes et grés tendres etc.

Les volumes à mettre en œuvre pour la construction d'un barrage en terre en général importants : 5 à 15 fois plus que le barrage en béton du type poids susceptible d'être réalisé sur le même site.

Pour des petits ouvrages, il est fréquent d'avoir à compacter de 20 000 à 100 000 m³ en terre. Les grands barrages nécessitent des millions et même des dizaines de millions de m³. De ce fait, il est rare, sauf pour les petits barrages de disposer sur place des matériaux permettant de bâtir une digue homogène. Le massif sera donc souvent constitué de plusieurs zones formées de terres de caractéristiques différentes.

V.3. Méthodes de construction des barrages en terre.

V.3.1. Exigences générales pour les matériaux des barrages en terre

Les principales qualités que doit avoir le sol pour le corps d'un barrage en terre homogène sont l'étanchéité, la résistance, caractérisée principalement par le frottement et la cohésion internes, et la résistance à l'eau.

Dans un barrage composé de plusieurs sols, chaque partie de celui-ci nécessite un sol qui a des qualités spécifiques pour cette partie particulière. Ainsi, la couche protectrice ne doit avoir que de la résistance et de la résistance à l'eau, car la résistance à l'eau du noyau et du diaphragme est particulièrement importante, pour les écrans - plasticité, résistance à l'eau et résistance. Les sols posés en haut de pente doivent généralement être aussi perméables que possible ; au contraire, il convient d'aménager la zone d'aval à partir du sol plus perméable, car cela conduit à une diminution de la courbe de dépression au voisinage de cette pente et à une augmentation de sa stabilité. Enfin, le matériau des prismes de drainage et des filtres de retour doit être poreux, et pour les filtres, en plus, choisi selon une certaine loi. Le matériau du barrage en remblai doit répondre à certaines exigences supplémentaires.



Photo1. Choix des matériaux.

Les barrages en terre peuvent être construits à partir de tous les types de sols, à l'exception de

- a) contenant des inclusions hydrosolubles de sels de chlorure à plus de 5 % en masse, de sels de sulfate ou de sulfate-chlorure à plus de 10 % en masse ;

- b) contenant plus de 5 % en masse de substances organiques non complètement décomposées (par exemple, des restes de plantes) ou plus de 8 % en masse de substances organiques entièrement décomposées à l'état amorphe ;

- c) sols fortement glacés et glacés.

Les sols indiqués aux alinéas "a" et "b" peuvent être utilisés pour créer un corps de barrage s'il existe une justification appropriée et sous réserve des mesures techniques de protection nécessaires, ainsi que du respect des règles de protection des eaux de surface contre la pollution par les eaux usées.

Dans la zone climatique de construction nord, il est permis d'utiliser des sols gelés à faible glace dans la construction de barrages en terre avec une justification appropriée.

La construction des digues et barrages en terre s'effectue le plus souvent selon les modalités suivantes

- ✚ Par remblayage mécanique du sol, suivi d'un nivellement, d'un apport d'humidité et d'un compactage. Cette méthode est la plus couramment utilisée.
- ✚ Les alluvions par hydro mécanisation ;
- ✚ Remblayage du sol dans l'eau sans compactage mécanique ;
- ✚ Explosions dirigées massives à libérer.

V.3.2. Construction de barrages en vrac et de barrages. Étendue des travaux

La construction de barrages en terre et de barrages est réalisée dans la séquence technologique appropriée des opérations de construction. Pour chaque type d'opération, les engins de chantier sont sélectionnés sur la base d'une variante de méthode de conception.

Dans le même temps, une comparaison technique et économique des options de la machine doit être effectuée.

En règle générale, au début de la construction des barrages en terre, l'enlèvement de la terre végétale de la surface de la base du barrage et de la surface des carrières ou des réserves de sol est effectué. Pour cela, des bulldozers ou des sont utilisés, qui sont sélectionnés en fonction de la quantité de travail et des propriétés du sol.



Photo 2. Grattoirs pour l'enlèvement de la terre végétale.

V.3.3. Sélection de groupes de machines

Les méthodes d'exécution des travaux et les ensembles de machines pour leur mise en œuvre sont sélectionnés en tenant compte de la position et de la taille relatives du barrage, des excavations utiles, des carrières et des réserves de sol, de l'épaisseur des couches de sol adaptées à la pose dans un remblai, des caractéristiques du sol et la nature des routes de dragage, le moment de la construction du barrage, etc.

Plusieurs méthodes peuvent être appliquées, et le choix final se fait en comparant les options en fonction d'indicateurs techniques et économiques (le coût d'une unité de travail et son intensité de travail). Le plus économique pour la construction de barrages bas en terre à usage agricole.

Il existe des ensembles de machines dans lesquelles les principales machines sont des grattoirs (avec une plage de mouvement du sol ne dépassant pas 200 à 500 m).

Avec une distance de déplacement du sol des carrières (réserves) à un remblai de plus de 500 m, il est plus économique d'utiliser des excavatrices (pelle droite ou dragline) avec un godet d'une

capacité de 0,5 à 1 m³ avec des camions à benne basculante ou un tracteur charrettes pour aménager et déplacer la terre.



Photo 3. Chargement de terre dans une carrière sur un camion à benne basculante.

Étant donné que les réserves de sol pour le remplissage du barrage et les excavations utiles (déversoir) sont généralement situées à des distances ne dépassant pas 100-400 m du barrage, il est préférable d'utiliser des ensembles de machines avec racleurs (le racleur automoteur D-357G reste un machine économique même avec une distance de déplacement de plus de 500 m).

V.3. 4. Préparation de la fondation du barrage



Photo 4. Grattoir pour préparation de fondation

Le sol végétal est coupé par des grattoirs et des bulldozers (ces derniers peuvent être utilisés efficacement à une distance de sol en mouvement jusqu'à 30-40 m) avec sa pose dans des décharges.

L'épaisseur de la couche coupée (mort-terrain) est déterminée par l'épaisseur du gazon et de la couche racinaire.

Avant que le remblai ne soit érigé, la base est humidifiée à la teneur en humidité optimale, puis compactée, et avant de poser la première couche de sol, elle est ameublie par hersage. Si des passages de terrassement sont trouvés dans la base, sa couche perturbée est ameublie avec des charrues ou des rippers, puis humidifiée et compactée.

Les tranchées pour une écluse dans un barrage sont arrachées par des grattoirs selon le schéma à double boucle ou en huit ou par des bulldozers, et si la nappe phréatique est haute, par des draglines ou des pelles rétrocaveuses.

Les mêmes machines sont utilisées pour aménager des fosses pour parafouille, déversoirs, déversoirs miniers (s'ils sont prévus par le projet).

Lorsque les eaux souterraines apparaissent dans les tranchées et les fosses, un drainage ou un assèchement est effectué. La tranchée du noyau est remplie d'argile ou de limon de la réserve avec nivellement et compactage couche par couche (avec une largeur de tranchée suffisante, cela se fait au rouleau).

V.3.5. Remblayage du barrage



Photo 5. Racleurs pour excavation du déversoir du barrage.

Le barrage est remblayé avec des racleurs avec le mouvement du sol des fosses et l'excavation du déversoir (en premier lieu), ainsi que des réserves (carrières).

Des réserves sont posées sur les pentes de la poutre - près de l'axe du barrage, ainsi que dans les bassins supérieur et inférieur - près du barrage de telle sorte que la marque de la base de la réserve ne soit pas inférieure à la marque de la crête du barrage. Le remplissage commence aux points les plus bas du remblai.

Le sol est coulé en horizontal ou avec une pente allant jusqu'à $i = 0,005$ jusqu'à la pente supérieure en couches.

V.3.6. Compactage du sol



Photo 6. Compactage du sol

L'épaisseur des couches de compactage dans le remblai et le nombre de passages d'engins sur une voie sont fixés par le projet en fonction du type de sol, de son taux d'humidité et du type d'engins de compactage.

Étant donné que le plus efficace et le moins cher est le compactage du sol à son taux d'humidité optimal.

Les sols excessivement humidifiés doivent être séchés sur les cartes de pose dans le remblai, et pour accélérer le processus, la surface de la couche séchée est desserrée par hersage.

Les sols secs sont humidifiés (le plus souvent dans un remblai par arrosage à partir de tuyaux avec alimentation en eau par des conduites d'eau temporaires ou des arroseurs, moins souvent par enfermement dans une carrière).

V.3.7. Écrans de barrage



Photo 7. Pose du dispositif anti-filtration sur la pente du barrage.

Un dispositif anti-filtration sur la pente supérieure du barrage qui réduit la filtration de l'eau à travers le corps du barrage.

En règle générale, des limons mélangés à de l'argile et du sable sont utilisés à cette fin. Parfois, le béton de boue est utilisé. La pose du talus intérieur de l'écran aménagé est conçue à partir des conditions de stabilité des talus acceptés du barrage. L'épaisseur de l'écran, mesurée perpendiculairement à la pente, est fixée à au moins 0,8 m et au pied du barrage à au moins 0,1 tête.

Les écrans sont disposés avec une pente de la surface inférieure non supérieure à $m = 3$. Ils sont érigés à partir de sols imperméables (argiles, limons) avec un compactage soigneux des couches de remplissage horizontal

V.3.8. Prisme de drainage des barrages



Photo 8. Barrage de Ghrib (Algérie)

L'un des éléments importants du barrage est son dispositif de drainage. Le drainage du barrage est constitué de matériaux hautement perméables et est conçu pour :

- ✚ La collecte et l'évacuation des eaux d'infiltration du barrage ;
- ✚ L'empêchement de l'écoulement de l'eau filtrée vers la pente aval dans la zone de gel possible ;
- ✚ Augmentation de la stabilité du talus aval en abaissant la surface de dépression ;
- ✚ L'amélioration de la stabilité de la pente aval en raison de l'épuisement rapide du réservoir, la suppression de la pression interstitielle à la suite de l'activité sismique, ainsi que pour l'élimination des écoulements d'infiltration à travers le barrage.

V.3.9. Surveillance et entretien des barrages

L'objet essentiel des mesures de surveillance et d'entretien des barrages est le maintien de leur fonctionnement dans de bonnes conditions de sécurité. La surveillance et l'auscultation sont préalables à toute opération d'entretien et doivent entrer en jeu dès la construction de l'ouvrage.

La surveillance systématique des barrages doit porter sur le repérage des zones éventuelles de fuite et de suintement, des déformations et des fissures. Elle doit être complétée par une auscultation plus précise, surtout lorsque l'ouvrage a présenté, lors de sa construction, des difficultés particulières, ou lorsque ses dimensions sont relativement importantes. Les principaux dispositifs d'auscultation utilisés peuvent être classés en cinq grandes catégories : mesures de déplacements superficiels par des procédés topographiques ; mesures de déplacements internes par tassomètres et clinomètres pour les barrages en matériaux meubles, par pendules pour les barrages en béton ; mesures de déformations locales par extensomètres pour les fondations rocheuses et les ouvrages massifs en béton ; mesures de phénomènes hydrauliques (mesure des débits de fuite, piézomètres pour la mesure des pressions interstitielles ; mesures de contraintes et de températures).

Le processus de mesure et d'exploitation des données doit être envisagé dès le stade des études. La fréquence des mesures doit être définie en fonction de l'ouvrage et de son exploitation, la période la plus sensible étant la première mise en eau du barrage (la vitesse de montée du plan d'eau doit être limitée et strictement contrôlée pendant cette phase). Dans les barrages modernes, la centralisation des mesures et leur traitement informatique automatique sont de plus en plus souvent considérés comme nécessaires.

V.3.10. Entretien

L'auscultation et la surveillance d'un ouvrage ont pour objet de mettre en évidence toute évolution rendant une intervention nécessaire soit sur les fondations, soit sur le barrage lui-même. Si les fondations sont rocheuses, les interventions se limitent généralement à la réduction des sous-pressions et à la limitation des débits de fuite (drainage et injections complémentaires). Si les fondations sont en terrain meuble, des déformations transversales importantes peuvent apparaître dans des couches de faible consistance (fluage de ces couches) nécessitant de mettre en place des banquettes latérales de part et d'autre du corps du barrage en remblais.

En ce qui concerne le corps du barrage, les interventions d'entretien peuvent être très variées (colmatage ou injection de fissures, amélioration du drainage, remise en état des masques amont, entretien des parements et de la crête...).

Enfin, des travaux d'entretien de la retenue elle-même peuvent être nécessaires comme l'élimination des dépôts solides et de la végétation, contrôle et maîtrise des fuites, d'éventuels glissements des berges.

Références bibliographiques

1. Bakhtine B.M. ; Karyoukine C.N. (1991). Ouvrages hydrauliques. Moscou. Edition : Agroprouzdat,351p
2. Costet G., G. Sanglerat (1983). Cours pratiques de des sols. Tome 2. Edition Dunod,
3. Degoutte G.1997.Petits barrages. Edition : Tech.Doc.
4. Grichine ,1979., Constructions Hydrauliques, Edition : Ecole supérieure, Moscou, 615p.
5. Jeleznikov G. B ; Ibad-zadi Y. A ; Ivanov P. L (1983). Ouvrages hydrotechniques. Edition : Stroizdat,543 p
6. Jouravlev (1979). Constructions hydrauliques. Edition : kolos, Moscou, 423 p.
7. Kozhevnikov N. N., Shkundin B. M. (1994). Nouveaux dispositifs pour les alluvions dispersées des travaux de terrassement. Journal » Construction hydrotechnique », Moscou, n° 9.
8. Ogurtsov A. I. (1974). Alluvions de terrassement des barrages en terre, Stroyizdat, Moscou.
9. Technique des barrages en aménagement rural.www.GCAlgerie.com
10. Volkov I.M. 1977. Conception des ouvrages hydrauliques. Moscou, Edition : Kolos.379p
11. Varlet, H. (1966). Barrages réservoirs. Barrages en terre et en enrochements. Tome 3. Eyrolles. Paris
12. Desodt, C. Horsin Molinaro, H. (2016) Phénomènes de boulangage et d'érosion régressive (renard hydraulique) dans les barrages,
13. www.universalis.fr/encyclopédie/barrages/8-surveillance.
14. ISO2.06.05-84. Document en langue russe

Annexe

✚ Exemples de barrages en terre, construit en Russie et dans d'autres pays

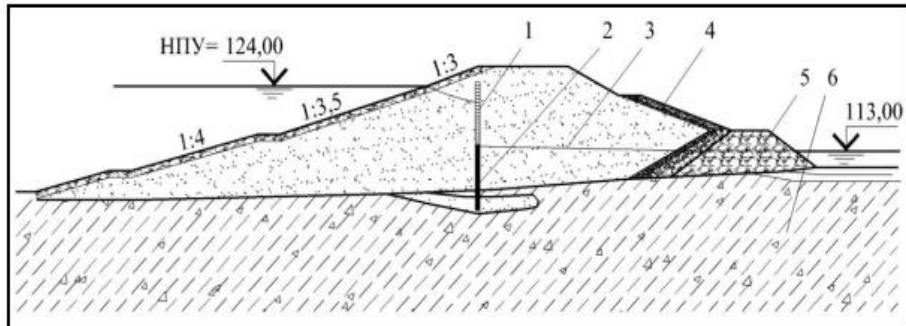


Figure 1. Barrage en terre du complexe hydroélectrique Ivankovsky sur la rivière. Volga, 1937

1 - diaphragme en bitume de bois ; 2 - palplanche métallique ; 3 - courbe de dépression ;
4 - drainage en couches ; 5 - prisme de drainage ; 6 - loam morainiques denses

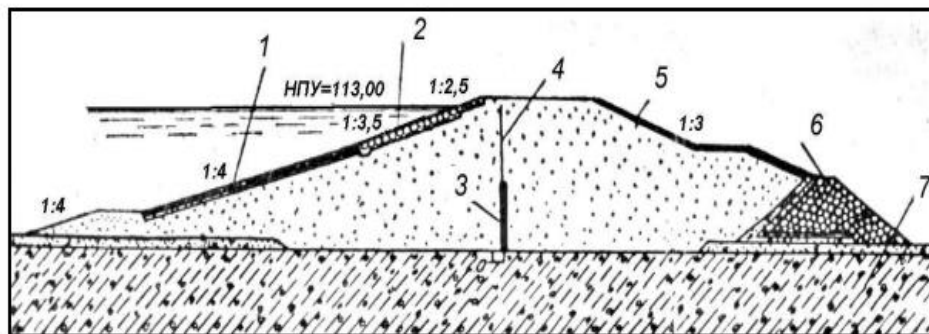


Figure 2. Barrage en terre du complexe hydroélectrique Uglich sur la rivière. Volga, 1940.

Hauteur du barrage est de 27 m.

1 - gravier ; 2 - dallage en pierre sur une couche de gravier ; 3 - languette métallique 4 - tôle ;
5 - gazon ; 6 - prisme de drainage ; 7 - loam morainiques

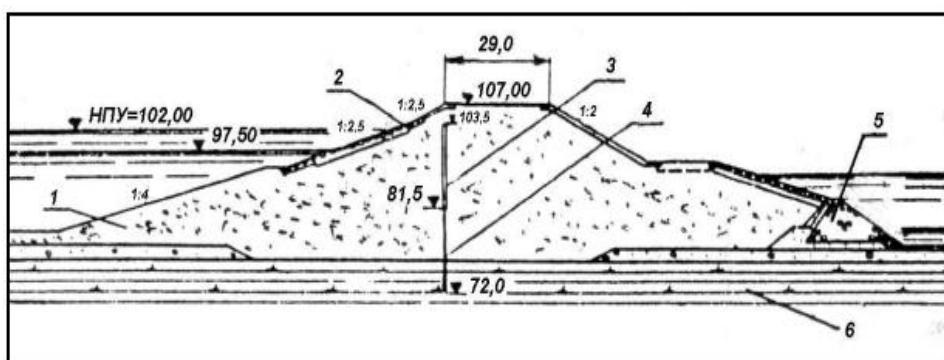


Figure 3. Barrage en terre du complexe hydroélectrique de Rybinsk sur la rivière. Volga, 1941 - 1947. Hauteur du barrage est de 30 m

1 - sables fins ; 2 - dallage en pierre sur une couche de gravier ; 3 - diaphragme en béton armé ;
4 - palplanche métallique ; 5 - prisme de drainage ; 6 - les argiles marneuses.

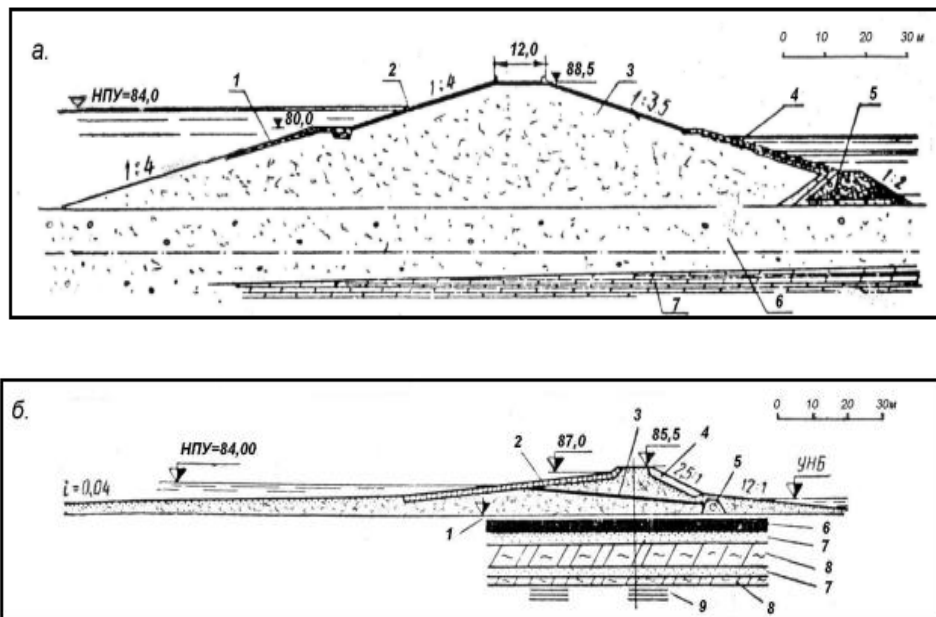


Figure 3. Barrage en terre du complexe hydroélectrique de Nizhny Novgorod sur la rivière. Volga, 1955 - 1957.

- a) Partie canal du barrage de 28 m de haut. 1 - enrochement ; 2 - dalles en béton armé de 0,2 à 0,4 m ; 3 - sables fins 4 - pavés en pierre ; 5 - banquet en pierre ; 6 - sables contenant du gravier et des cailloux ; 7 - siltstones
- b) Partie inondable du barrage de 15 m de haut. 1 - loam sableux ; 2 - couverture de gravier ; 3 - courbe de dépression ; 4 - sol végétal 5 - drainage tubulaire ; 6 - alluvion ; 7 - sable fin ; 8 - loam limoneux ; 9 - argile marneuse

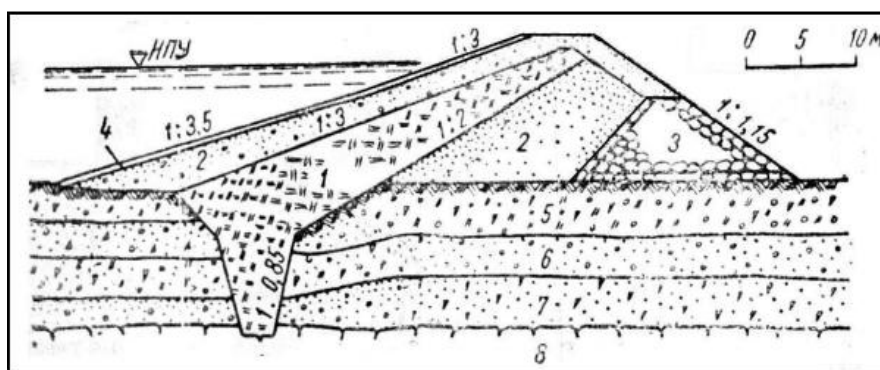


Figure 4. Barrage en vrac sur la rivière. Kamenouchka, 1960 ; hauteur du barrage 15,5 m. 1 - écran en terre grasse ; 2 - loam sableux graveleux ; 3 - enrochement 4 - double pavage de 0,3 m sur une couche de gravier ; 5 - loam sableux avec pierre concassée ; 6 - sol de galets et de gravier avec du sable ; 7 - pierre concassée avec gravier et sable ; 8 - les granodiorites

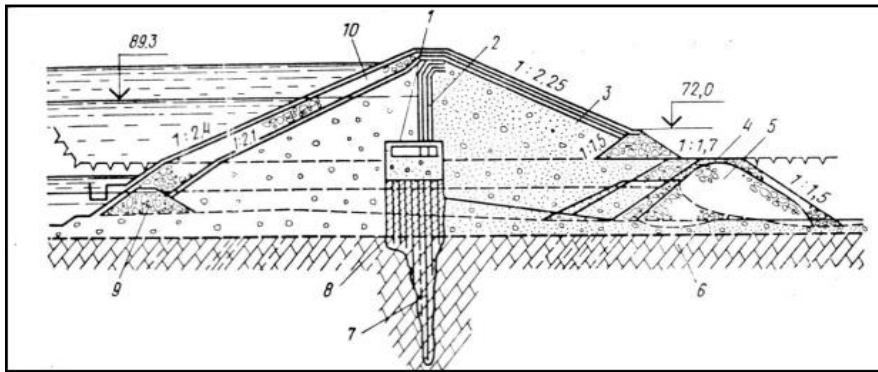


Figure 5. Barrage At-Bashi sur la rivière At-Bashi, Kirghizistan, 1960 ;
Hauteur du barrage 75 m

1 - bouchon en béton (dalle) ; 2 - un diaphragme en film de polyéthylène entre deux Couches de sable ; 3 - sol de galets ; 4 - zones de transition avec filtre inversé 5 - banquet ;
6 - calcaires ; 7 - rideau d'injection ; 8 - rideau imperméable ;
9 - prisme persistant ; 10 - couche protectrice.

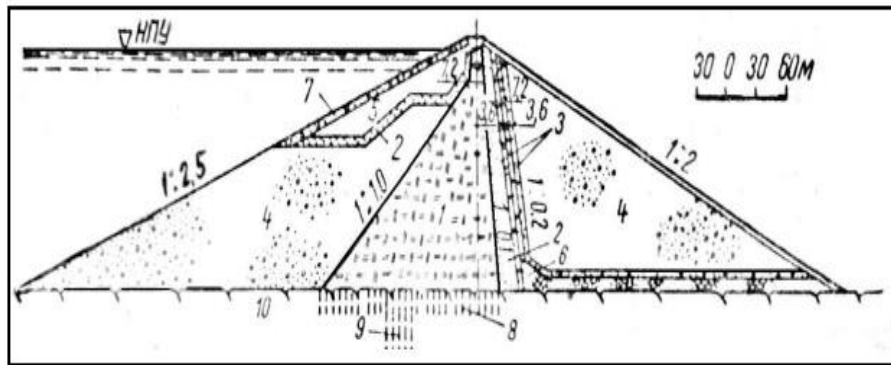


Figure 6. Le barrage en remblai de Bennet sur la rivière. Peace river. Canada, 1967
Hauteur du barrage 183 m.

1 - noyau de sol sablo-limoneux ; 2 - filtre à sable ; 3 - zone de transition du mélange sable-gravier ; 4 - moraine limono-sableuse avec une pierre de 0,36 m ; 5 - mélange gravier - sable ;
6 - gravier grossier ; 7 - fixation avec une pierre ; 8 - injection de surface ; 9 - rideau imperméable ; 10 - schistes et grès en couches minces

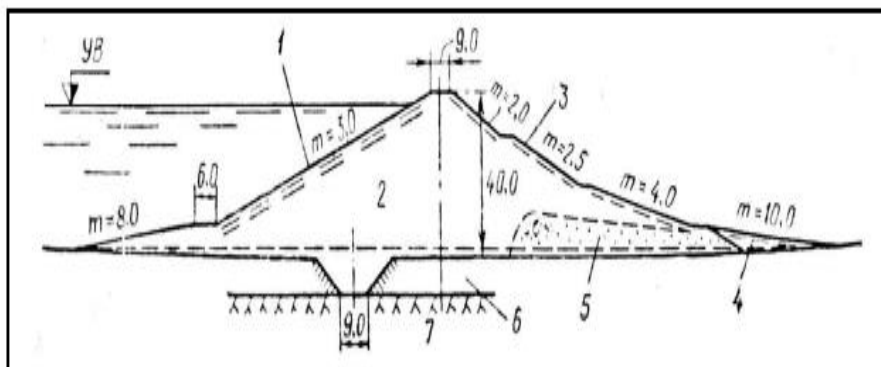


Figure 7. Barrage en vrac Boni sur la rivière. S. Fk. Républicain, États-Unis, 1948 -1950 ;
Hauteur 40 m.

1 - chaussée le long d'une couche de gravier ; 2 - loess (limon, argile, sable) ; 3 - semer des graminées 4 - divers sols provenant de fouilles utiles ; 5 - sable et gravier ; 6 - sable, argile, limon ; 7 - sol racinaire