

Introduction

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

De forme trapézoïdale, les barrages en remblais sont des barrages à forte emprise au sol. Grâce à leur forte emprise au sol, ils peuvent reposer sur des fondations de qualité moyenne, là où un barrage en béton ne pourrait pas être construit.

Les barrages en remblais résistent à la pression de l'eau grâce à leur poids, une caractéristique qu'il partage avec les barrages poids.

La pente des barrages en remblais est généralement faible, mais elle peut évoluer en fonction du matériau utilisé.

Les organes d'étanchéités des barrages en remblais

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

1 - Noyau en argile compacte

Le noyau est construit en argile compactée, centré verticalement au milieu du barrage ou incliné à l'amont. Son épaisseur est fixée en fonction de la hauteur du barrage et doit être vérifiée pour que le gradient hydraulique soit admissible et donc éviter l'érosion interne du noyau par les eaux d'infiltration.

2 - Masque amont

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

a) Masque en béton de ciment

C'est le type de masque le plus ancien et qui est pratiquement abandonné à cause de sa rigidité qui s'accommode très mal des déformations du massif support. En général il se compose de dalles préfabriquées ou coulées sur site avec des joints de dilatation qui atténuent l'effet des déformations du béton. (Figure 01).

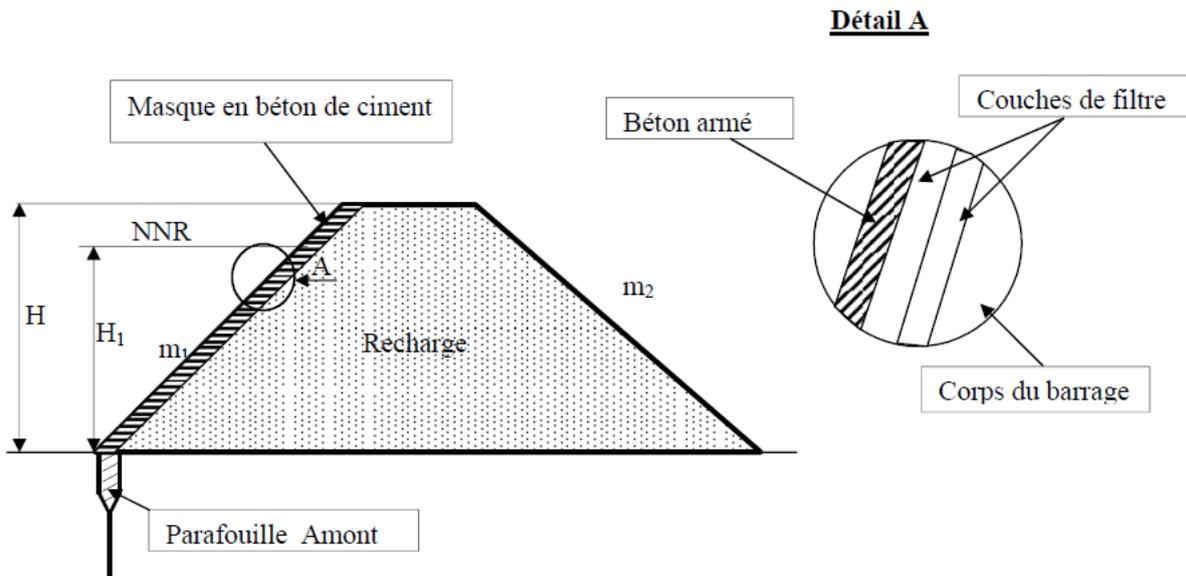


Figure 01 : Masque amont en béton de ciment

b) Masque en béton bitumineux

Le masque en béton bitumineux est réalisé à l'aide de bitume et il est bien efficace dans la mesure où il présente une grande étanchéité par rapport à ceux réalisés en béton de ciment. Sa souplesse lui permet de suivre aisément les mouvements du remblai sans subir de dégradations importantes. Ce type de masque présente aussi l'avantage d'être économique et facilement réparable. (Figure 02).

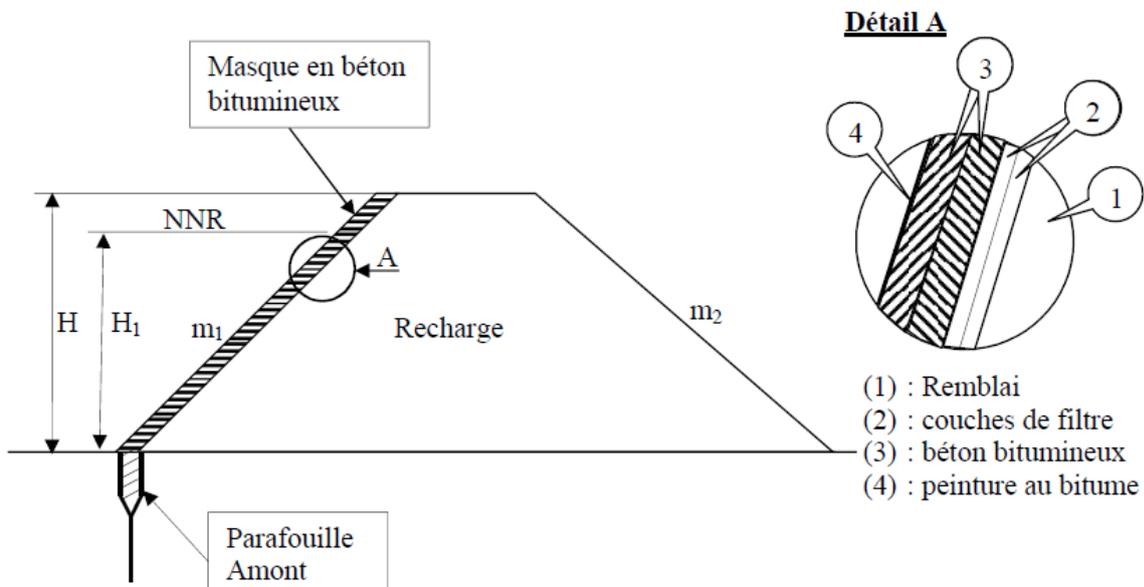


Figure 02: Masque amont en béton bitumineux

Mais il présente l'inconvénient de ne pas bien résister aux aléas climatiques qui accélèrent son vieillissement.

c) Masque en membrane souple

Le masque en membrane souple est un procédé d'étanchéité relativement récent. Il présente l'avantage d'être très simple à réaliser et résistant physiquement et chimiquement avec toutefois l'inconvénient d'être sensible aux chocs et aux poinçonnements (Keddouri, 2011). Pour la réalisation de ce type de masque les produits, les plus utilisés sont : le butyle caoutchouc, les matières plastiques, les produits bitumineux etc. (Figure 03).

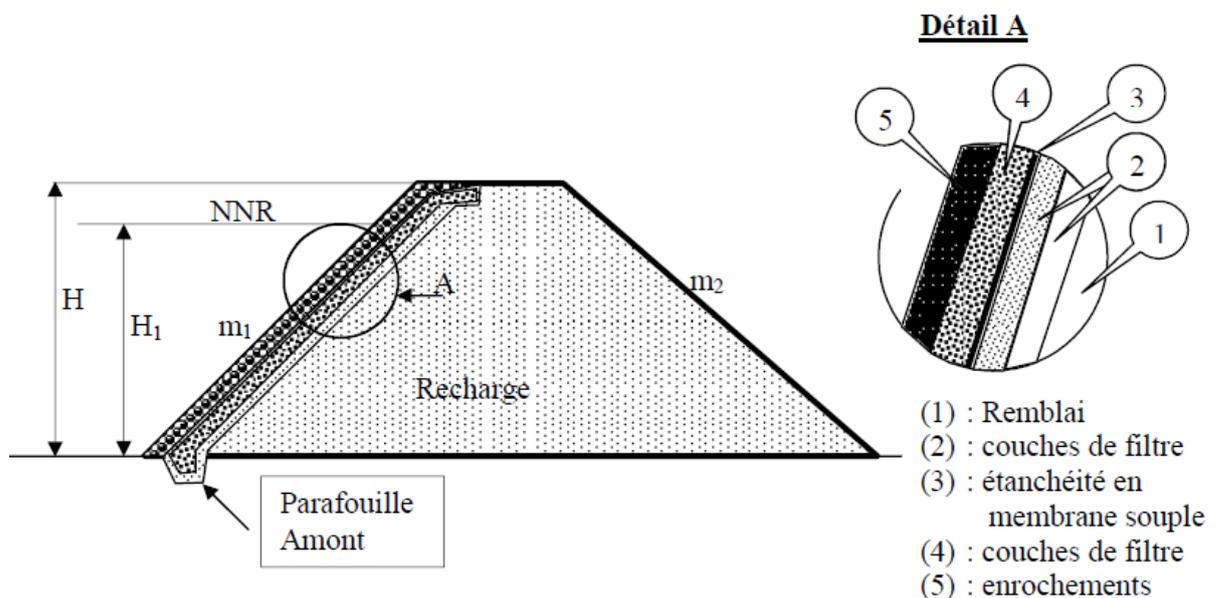


Figure 03 : Masque en membrane souple

II- Etanchéité des fondations des barrages en terre

Lorsque les fondations du barrage sont imperméables, il suffit d'assurer la liaison entre le massif du barrage et sa fondation en réalisant un ancrage du dispositif d'étanchéité pour empêcher les infiltrations suivant la ligne de contact entre le barrage et sa fondation. Dans le cas où les fondations sont perméables, leur traitement est indispensable pour les rendre étanches. Ce traitement est fonction de la nature des matériaux les constituant et de leurs profondeurs.

b) Paroi moulée

On appelle paroi moulée un écran vertical construit à partir de la surface des fondations par excavation sans blindage et rechargé de coulis auto-durcissable de bentonite avec ciment ou en béton plastique. (Figure 04).

Cette technique est envisagée dans les terrains meubles et dans les fondations rocheuses grâce à de nouvelles techniques appelées hydro fraise

Elle peut entraîner des désordres s'il se produit des déplacements importants, comme le poinçonnement inverse du remblai dans le cas d'un fort tassement de la fondation meuble.

Si cette paroi est située au pied amont du remblai, elle peut subir un cisaillement important dans sa partie supérieure.

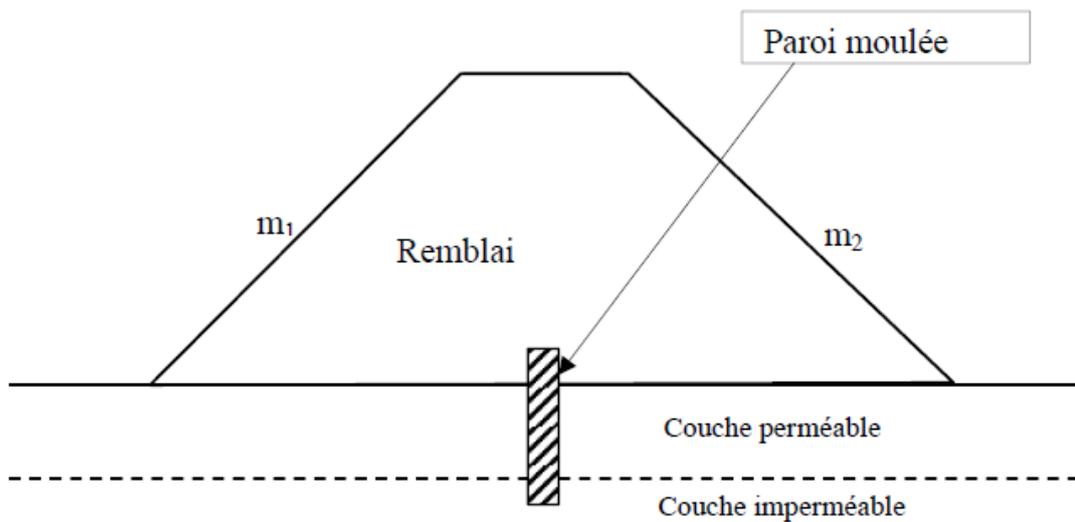


Figure 04 : Paroi moulée

d) Traitement des fondations par injection

L'injection consiste à faire pénétrer dans un milieu plus ou moins perméable un matériau pompable appelé coulis d'injection. L'injection s'effectue généralement par des forages réalisés dans le milieu à traiter et a pour but le plus souvent d'en améliorer la résistance mécanique et de réduire sa perméabilité. (Figure 05).

Les injections sont utilisables aussi bien dans le cas d'une fondation meuble que dans celui de massifs rocheux plus ou moins fissurés. Les produits d'injection étant adaptés au matériau traité (coulis de bentonite et ciment, coulis spéciaux). La coupure comporte le plus souvent, trois lignes de forages, comme l'injection ne peut être efficace en surface, soit on

Dispositifs de protection des barrages en terre

recoupe les premiers mètres injectés par une clé d'étanchéité, soit on traite à partir d'une certaine hauteur de remblai. (Messaid, 2009)

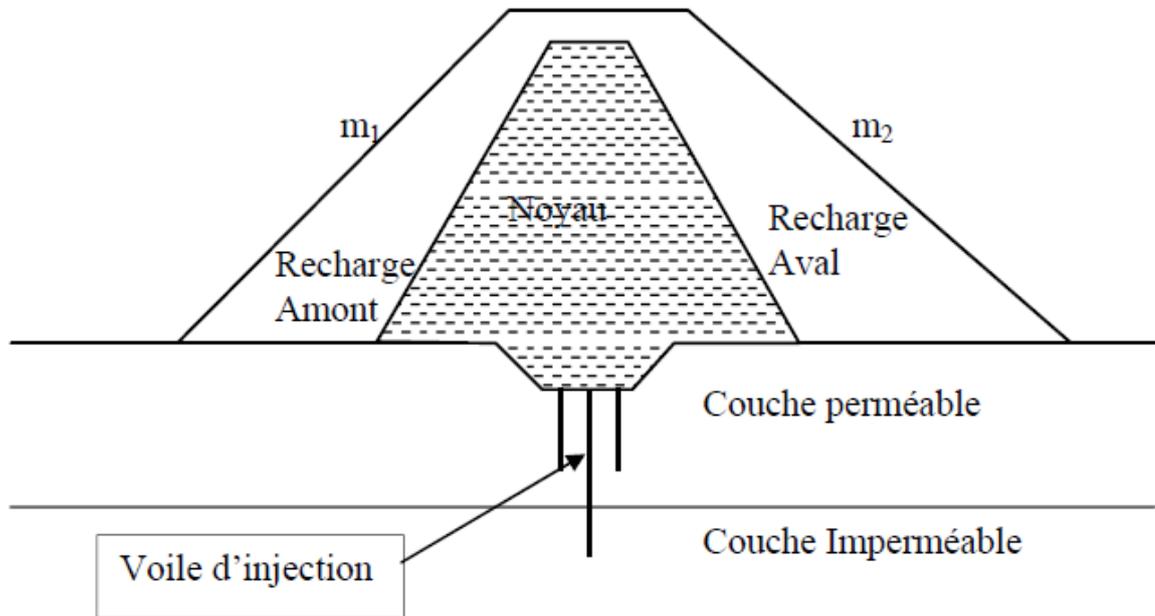


Figure 5 : Voile d'injection

d) Tapis d'étanchéité amont

Lorsque l'étanchéité de la retenue ne peut pas être réalisée par une coupure au droit du barrage, la solution consiste à étancher la cuvette totalement ou partiellement à l'aide d'un tapis en matériaux argileux compactés. On peut adjoindre aux matériaux argileux des produits d'étanchéité, des polymères synthétiques et de la bentonite pour améliorer son efficacité. (Figure 06).

Dispositifs de protection des barrages en terre

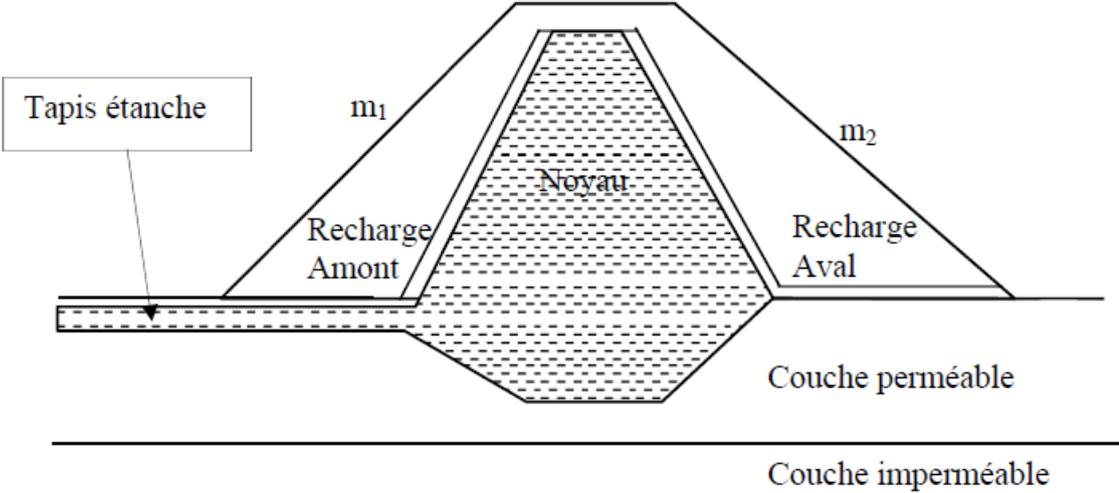


Figure 6 : Tapis d'étanchéité

Dispositifs de protection des barrages en terre

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

Le contrôle des infiltrations constitue l'un des principaux éléments de conception des barrages en terre lorsque sous la charge hydraulique créée par le réservoir, l'eau qui 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 interstitielles d'écoulement de l'eau dans le corps du barrage qui se fragilise ce dernier, et pour maintenir l'état du barrage et le protéger il est prévu des solutions fiables telle que

- Implantation des **filtres** pour se prémunir contre l'érosion interne dans le mur du barrage ainsi que la fondation ;
- L'allongement du chemin d'écoulement pour réduire les infiltrations (débit et pression) par des éléments de conception ;
- Mis en place **drains** ou de puits de drainage, a pour but de la dissipation des pressions d'eau

Filtres

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

a) Rôle des filtres :

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

Parmi leurs rôles on peut citer :

Dispositifs de protection des barrages en terre

- Entreposés entre deux couches à granulométrie différentes, ils évitent que les grains fins de la première couche ne soient entraînés par les eaux d'infiltration à travers les matériaux de gros diamètres.
- Entreposés de part et d'autre d'un noyau d'étanchéité ou sous un écran d'étanchéité, ils jouent le rôle de couches drainantes en évacuant les eaux d'infiltration vers l'aval du barrage.
- Intercalés entre un massif de barrage et sa fondation, si elle est argileuse, contribue grandement à activer sa consolidation grâce à leur rôle drainant qui réduit les pressions internes.

b) Composition des filtres :

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

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

c) Dimensionnement des filtres :

Les filtres doivent être :

Filtrants : ils doivent retenir la partie fine des matériaux fins du massif.

Drainants : ils doivent être plus perméables que le massif argileux pour évacuer les débits et diminuer les pressions.

Ils sont constitués de sables et de graviers en couches successives de matériaux perméables de granulométrie de plus en plus fine assurant la transition entre le drain et les éléments fins de terre drainés, chaque couche doit jouer le rôle de filtre vis-à-vis de la couche précédente. Plus récemment, les filtres granulaires sont de plus en plus remplacés par des géotextiles très économiques et faciles à mettre en œuvre.

Loi des filtres :

Les filtres doivent assurer plusieurs critères, les plus communément utilisés sont ceux établis par Bertram (Université de Harvard 1967), basés sur les conditions de TERZHAGHI,

Dispositifs de protection des barrages en terre

perfectionnés ensuite par les travaux du Corps d'Ingénieurs de l'Armée et le Bureau de Réclamations des Etats-Unis et enfin enrichis par les travaux de SHERARD (1984). Dans les équations (01 et 02) désigne la taille des grains du matériau le plus grossier et d celle des plus fins.

Critère filtrant :

Ce critère assure que la partie grossière du matériau fin ne sera pas entraînée dans les interstices du filtre.

$$\frac{D_{15 \text{ filtre}}}{d_{85 \text{ sol}}} \leq 5 \quad 01$$

D_{15} et d_{85} sont les diamètres correspondant respectivement à 15 % et 85% de pourcentage de tamisat cumulé.

Critère drainant

Le filtre doit en plus être suffisamment perméable pour évacuer le débit d'infiltration. Le critère utilisé pour que le contraste de perméabilité entre filtre et matériau fin soit suffisant est basé sur le rapport des diamètres D_{15} .

$$\frac{D_{15 \text{ filtre}}}{d_{15 \text{ sol}}} \geq 5 \quad 02$$

À partir des critères filtrant et drainant, la Loi des filtres peut donc s'énoncer simplement par :

$$5d_{85 \text{ sol}} \geq D_{15 \text{ filtre}} \geq 5d_{15 \text{ sol}}$$

En outre, pour s'assurer de la stabilité interne du matériau filtrant ou drainant, on devra vérifier

La condition d'uniformité des filtres

$$2 < \frac{D_{60}}{D_{10}} < 8$$

Le parallélisme des courbes granulométrique :

$$5 < \frac{D_{50 \text{ filtre}}}{D_{50 \text{ sol}}} < 10$$

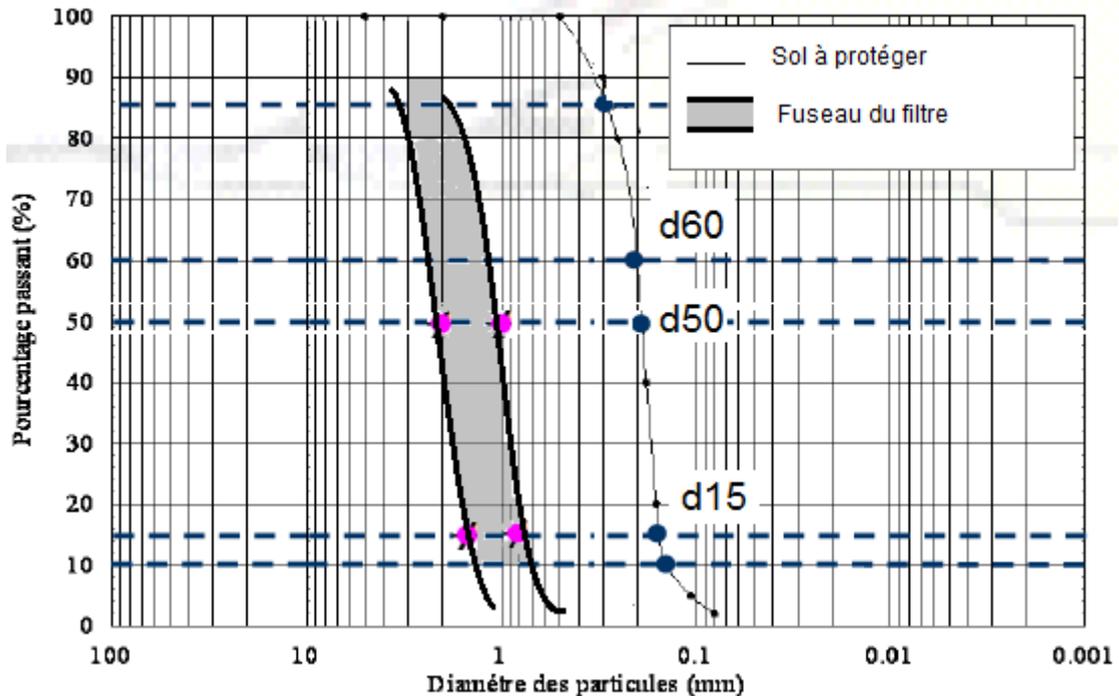


Figure 07 Exemple de fuseau granulométrique de filtre.

Ces règles permettent de déterminer un fuseau du filtre connaissant la granulométrie du sol à protéger contre la migration des grains (Figure 36). Généralement plusieurs couches de granulométrie croissante vers le drain sont nécessaires pour respecter les critères du filtre.

$$5d_{85} < D_{15} < 5d_{15} \quad 5D_{85} < \Delta_{15} < 5D_{15}$$

d : pour le remblai

D : pour le filtre

Δ: pour le drain

Épaisseur du filtre

L'épaisseur du filtre ne doit pas être inférieure à 25 cm pour tenir compte des tassements qui se produisent dans tout le remblai. Cette épaisseur doit être toujours supérieure ou égale à 50 D₁₅.

Dispositifs de protection des barrages en terre

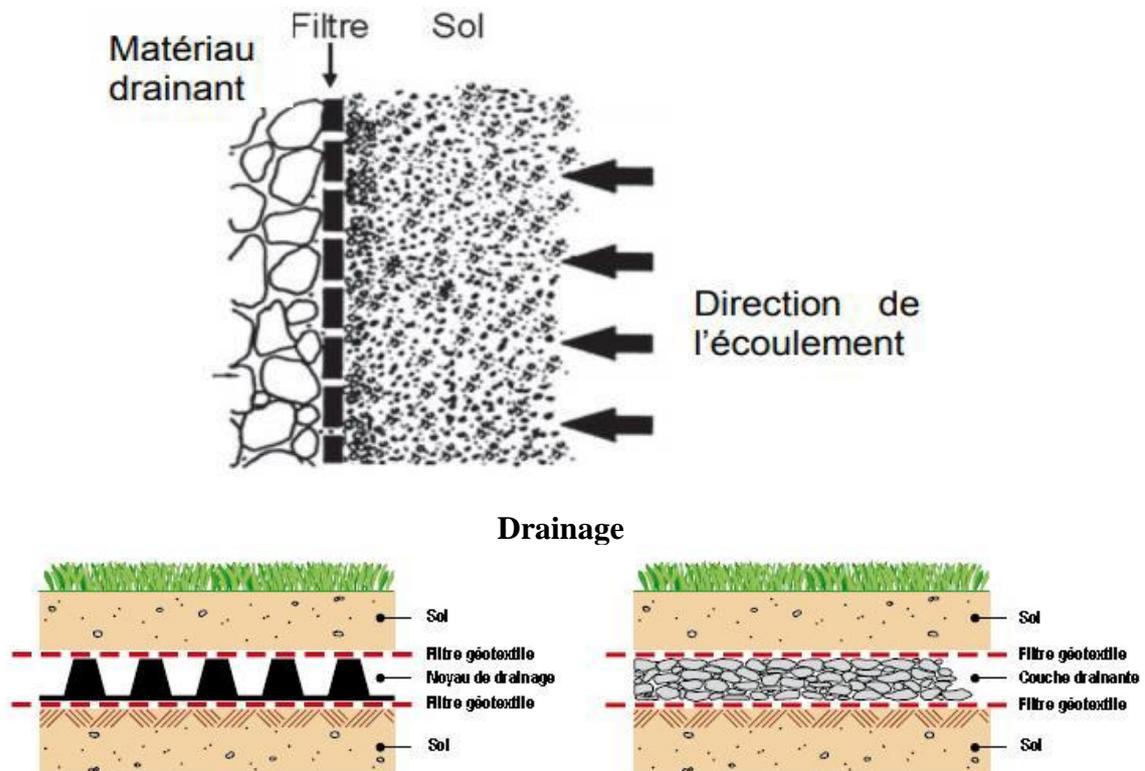
Si la couche filtrante sert à drainer les eaux d'infiltration, sa capacité drainante doit être plus grande que le débit qui traverse le remblai et peut être vérifiée à l'aide de la loi de Darcy (CIGB, 1993).m

Les épaisseurs minimales recommandées pour les filtres sont:

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

Filtre en géotextiles

Les géotextiles peuvent aussi jouer un rôle de filtre à la place d'un filtre granulaire. Leur rôle est de maintenir les particules pour qu'elles ne soient pas mises en mouvement par l'écoulement venant de l'intérieur du massif tout en laissant la libre circulation de l'eau sur le long terme (Figure 08).



Filtration



Figure 08 : Fonctionnement de filtre géotextiles

Drains :

a) Définition :

Le drain est un organe fortement perméable incorporé dans le barrage en terre. Il est généralement constitué de graviers et d'énrochements avec des caractéristiques de non altération au contact de l'eau et résistant aux grandes compressions. Il est admis que la présence de drain dans les barrages en terre est indispensable pour leur stabilité. Parfois le drain classique est remplacé par des tuyaux poreux ou perforés en matière. On utilise également de plus en plus des géotextiles pour assurer le drainage des petits barrages. (MESSAID, 2009)

b) Rôle des drains :

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

- Intercepter les eaux d'infiltration et les évacuer à l'aval du barrage.
- Abaisser la ligne de saturation et éviter les résurgences sur le talus aval.
- Abaisser la ligne de saturation, pour garder une grande partie du remblai non saturé afin de conserver les caractéristiques géotechniques du matériau utilisé.
- La présence du drain dans un barrage en terre sert à minimiser le débit de fuite sur l'ouvrage.
- Il sert aussi à décompresser la fondation et donc à minimiser les pressions interstitielles.
- La présence du drain permet d'activer la consolidation du remblai (CIGB, 1993).

c) Principe et Constitution

Les drains sont constitués de graviers perméables de granulométrie bien définie. Ils sont généralement fabriqués à partir d'alluvions ou d'énrochement de carrière.

– Capacité de décharge des drains

La perméabilité et les dimensions des drains doivent être suffisantes pour que la surface libre reste dans le drain. Dispositifs de protection contre les effets de l'eau

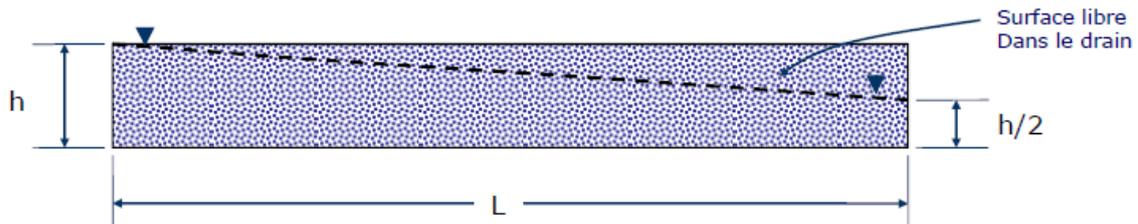
Dispositifs de protection des barrages en terre

Pour un drain horizontal de longueur L et d'épaisseur h , le gradient est égal à $h/2L$ et une section moyenne de $(h+h/2)^2$. La capacité de décharge est alors :

$$q = k \cdot i \cdot A = k \cdot (h/2L) \cdot (3h/4) = 3kh^2/8L$$

Pour un drain quasi vertical, on suppose que le gradient est voisin de 1 et la capacité de décharge devient :

$$q = k \cdot i \cdot A = k \cdot A$$



Les dimensions des drains et des filtres sont souvent influencées par la facilité de mise en place (largeur des équipements) et les déformations anticipées (tassement de la fondation).

Protection des talus

Les talus des barrages en terre doivent être protégés des actions extérieures telles que l'érosion due aux ruissellements des eaux de pluie, l'effet de renard provoqué par le ressuyage des eaux de saturation du barrage et l'agression des vagues de la retenue du côté amont.

La protection est en général assurée en amont et en aval

a) En amont

- Le Rip-Rap : c'est une couche d'enrochements posés sur un filtre de transition (Figure09). La taille des blocs, qui dépend de la hauteur des vagues et de la pente du talus peut dépasser 1 m. Les éléments de l'enrochement doivent être tel que 50% des pierres aient un diamètre supérieur à 20cm et pas moins de 10 cm pour les éléments les plus petits

Dispositifs de protection des barrages en terre

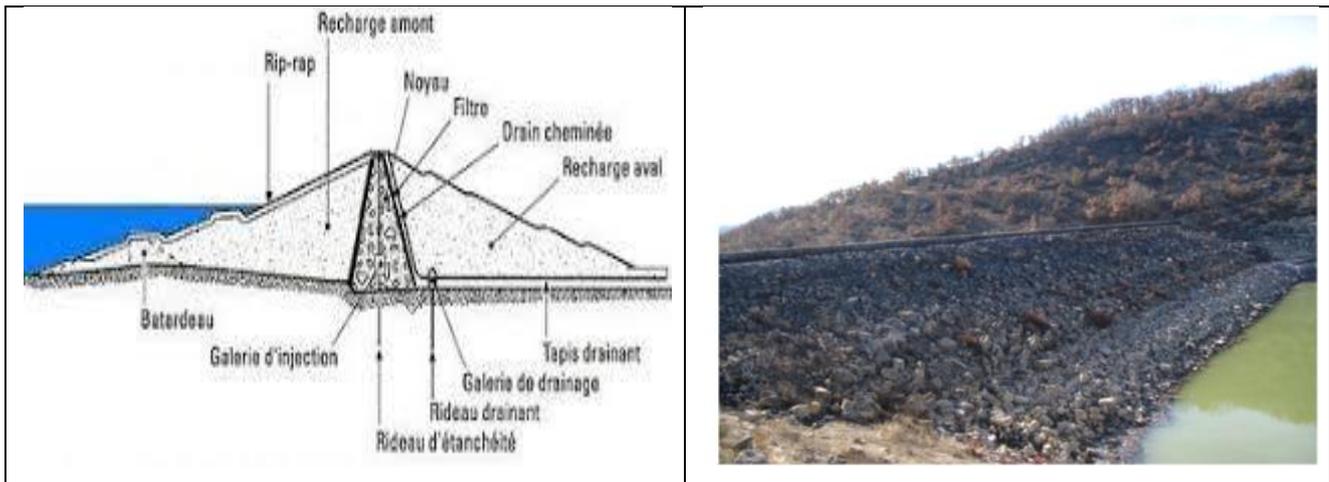


Figure 09: Protection amont en enrochements

✓ blocs artificiels en béton : Quand il n'existe pas d'enrochements disponibles, on peut constituer un assemblage de blocs artificiels en béton.

b) A l'aval

Un engazonnement : il doit être réalisé immédiatement après l'achèvement des travaux de réalisation en recouvrant le parement d'une couche de terre végétale de 5 à 10cm.

Disposition des drains et des filtres

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

a) Drains tapis

Le tapis drainant aval couvre la moitié aval de la fondation à partir de la base du noyau et conduit les fuites jusqu'au pied aval, son épaisseur minimale est de 50 cm (Figure 10). Lorsque la fondation n'est pas complètement imperméable le drain doit intercepter également les infiltrations à travers la fondation, il doit être protégé contre l'entraînement des éléments fins de la fondation par un filtre inversé (figure 11)

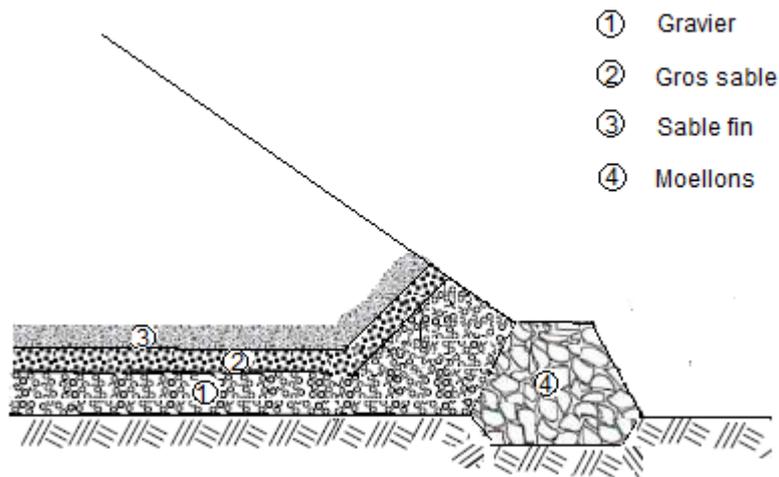


Figure 10: Disposition du drain et du filtre (fondation imperméable)

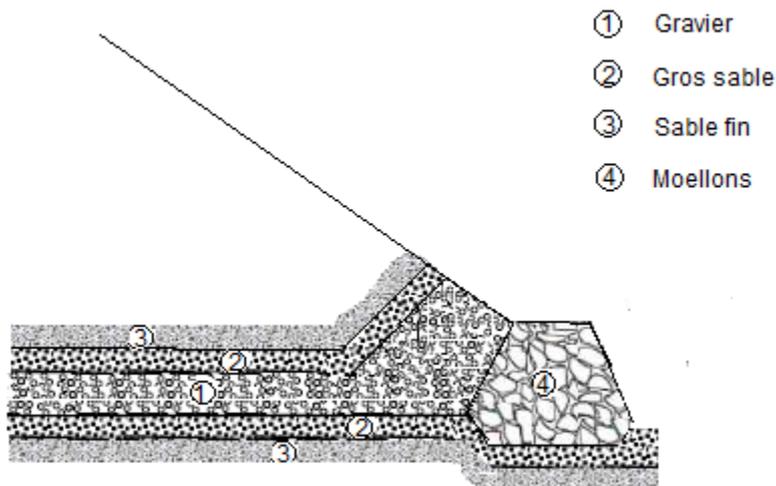


Figure 11: Disposition du drain et du filtre (fondation perméable)

b) **Drain cheminé**

Il est disposé quasi verticalement à l'aval du noyau (ou bien vers le centre d'un remblai homogène) ; son épaisseur est souvent de l'ordre de 3 m pour des raisons constructives. Il est mis en œuvre par déversement du matériau dans une tranchée de 1.5 à 2 m de profondeur recreusé dans le massif compacté au fur et à mesure de l'avancement des travaux de réalisation.

Dispositifs de protection des barrages en terre

Le filtre est assuré par un tapis synthétique placé au fond de la tranchée le long de la paroi amont du drain et au dessus du drain. L'eau interceptée est évacuée soit par un réseau de tuyaux drains soit par un drain tapis (figure 12).

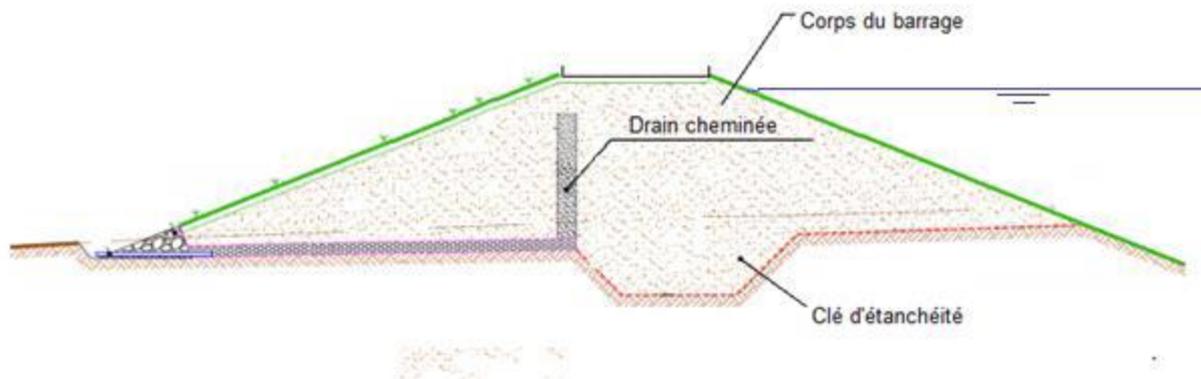


Figure 12: Drain vertical

c) Puits filtrants

Les puits filtrants sont des puits de décharge forés au pied aval du remblai et au dessous du drain tapis, ils sont nécessaires pour le drainage de la fondation et l'élimination des sous pressions. Les puits qui débouchent dans le drain tapis sont remblayés en matériaux filtrant analogue à ceux d'un drain vertical (Figure 13).

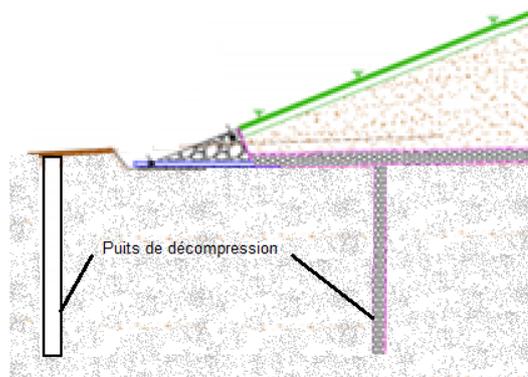


Figure 13: Puits filtrants

Application

Il a été proposé de placer le matériau de la zone A immédiatement adjacent au matériau de zone B dans un barrage en terre zoné. Les courbes granulométriques des zones A et B sont illustrées dans la figure 14. Evaluer la possibilité d'ajouter une zone de transition entre A et B en effectuant les calculs appropriés.

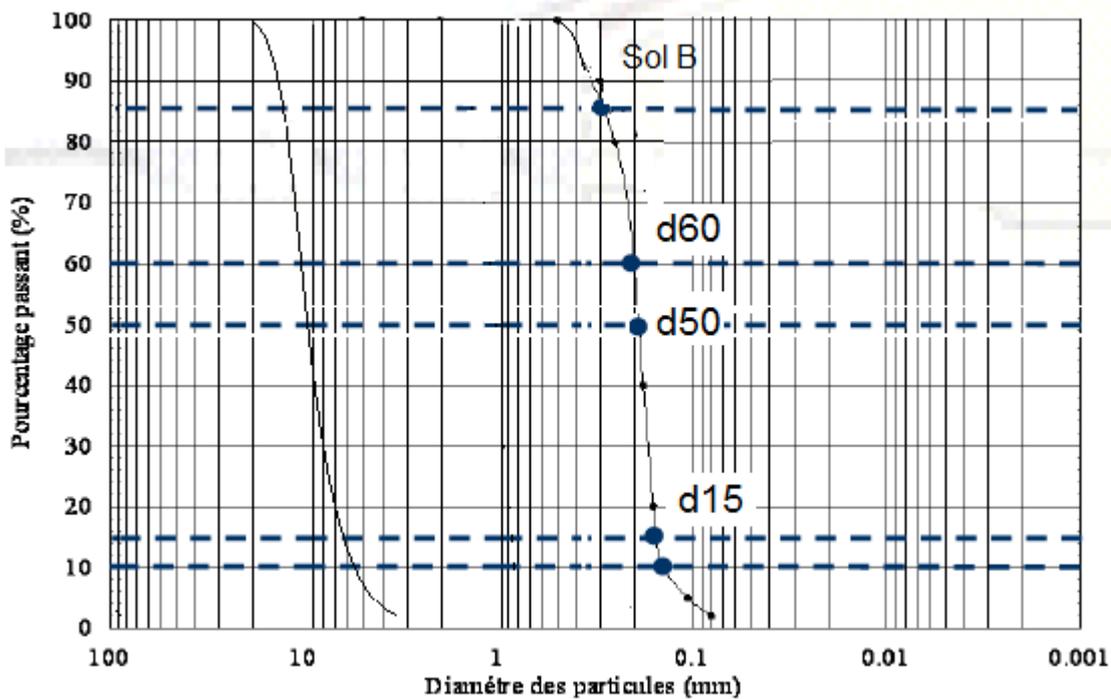


Figure 14: Courbe granulométriques des sols A et B

Solution

1- Vérifions le critère filtrant entre A et B:

$$D_{15}(\text{filtre}) \leq 5 d_{85}(\text{sol})$$

$d_{85}(\text{sol B}) = 0.3 \text{ mm}$ et $D_{15}(\text{sol A}) = 6 \text{ mm}$. $6 > 5 \times 0.3 = 1.5 \text{ mm}$.

Le critère n'étant pas vérifié, une zone de transition est nécessaire.

2- dimensionnement de la transition

Condition sur le d_{15} de la transition :

$$5 \cdot d_{15}(\text{sol B}) < d_{15}(\text{transition}) < 5 \cdot d_{85}(\text{sol B})$$

$d_{85}(\text{sol B}) = 0.3 \text{ mm}$ et $d_{15}(\text{sol B}) = 0.18 \text{ mm}$. **$0.9 \text{ mm} < d_{15}(\text{transition}) < 1.5 \text{ mm}$**

Condition sur le d_{50} de la transition

$$5 \cdot d_{50}(\text{sol B}) < d_{50}(\text{transition}) < 10 \cdot D_{50}(\text{sol B})$$

$D_{50}(\text{sol B}) = 0.2 \text{ mm}$. **$1 \text{ mm} < d_{50}(\text{transition}) < 2 \text{ mm}$**

Dispositifs de protection des barrages en terre

La condition à respecter entre le sol A est la transition est :

$$d_{50}(\text{transition}) < d_{50}(\text{sol A}) < 10 \cdot d_{50}(\text{transition}).$$

D'où $5 \cdot d_{50}(\text{transition}) < 7\text{mm} < 10 \cdot d_{50}(\text{transition})$, soit **1.1 mm < $d_{50}(\text{transition})$ < 2.2 mm**

On choisit une zone de transition intermédiaire de fuseau représenté dans la figure 15.

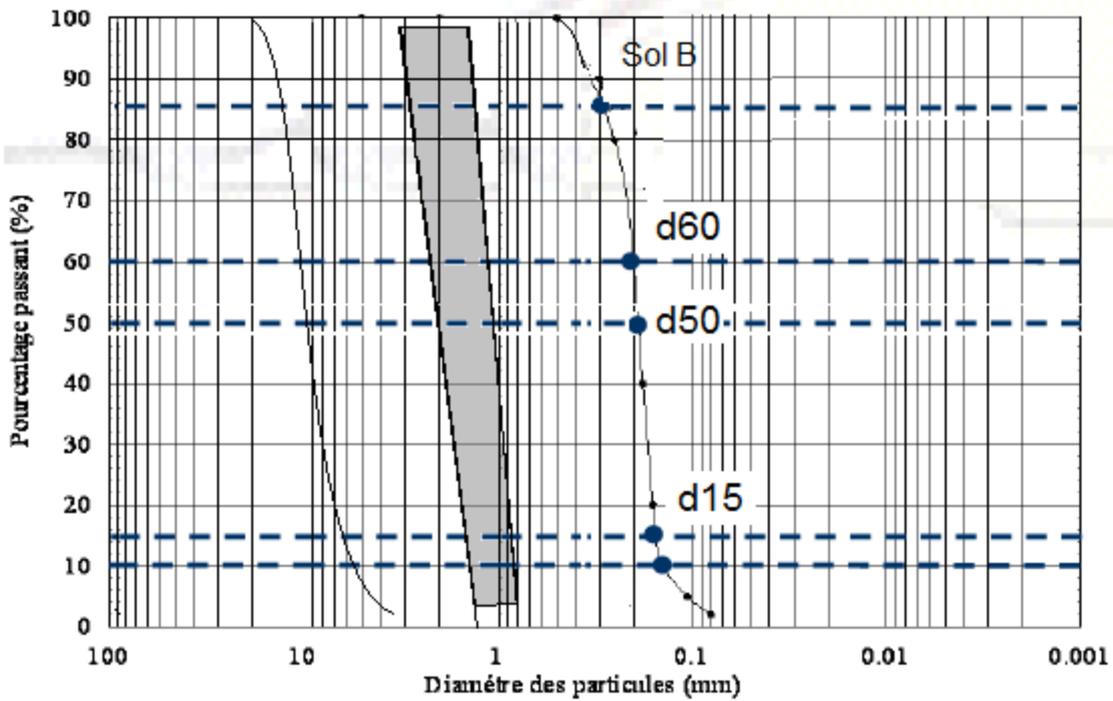


Figure 15: Fuseau granulométrique de la zone de transition

Références bibliographiques

- Bekkouche, Abdelmalek.** 2016. Mécanique des sols et Ingénierie Géotechnique, Fluides Interstitiels. Université de Tlemcen.
- Bertram, G. E.** (1967). Experience with seepage control measures in earth and rockfill dams. In Transactions 9th congress on large dams. Istanbul (Vol. 3).
- CETMEF.** 2014. Guide Enrochement, L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques.
- CFGB.** 1997. Petits Barrages, Recommandations pour la Conception, La réalisation et le suivi. s.l. : Cemagref,
- Bouzi, T.** (2010). Les barrages et la politique hydraulique en Algérie: état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable. These de doctorat, Université de Mentouri–Constantine.
- Degoutte, G. and P. Royet** (1999). Aide-mémoire de mécanique des sols, ENGREF.
- Keddouri, Ahmed.** 2011. ETUDE DES PATHOLOGIES DE LA DIGUE DE OUED KREIRECH WILAYA DE DJELFA. Tlemcen : Mémoire de Magister,
- Le Delliou, P.** (2003). Les barrages: conception et maintenance. Presses Universitaires Lyon.
- Mallet, C. and Pacquant, J.** (1951). Les barrages en terre. Eyrolles, Paris
- Messaïd, Belkacem.** 2009. Etude de la position efficace des drains dans les
- Millogo Founémé, A** (2009). Ouvrages hydraulique. Polycopié de cours
- PNUD/OPE,** (1980). Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord , Guide méthodologique pour l'exécution des études et la construction des retenues collinaires.
- Polycopié :** (2010) Les barrages en remblai de terre Lehabab USTO Oran
- Post, G., & Guerber, P.** (1973). Conception du drainage dans les barrages en terre. La Houille Blanche, (5-6), 467-476.
- Rodríguez, B. A. and S. La Rosa** (2004). Manuel de conception et projets typiques des digues en terre.
- Rolley, R., H. Kreitmann, J. Dunlas, A. Pierrejean and L. Rolland** (1977). Technique des barrages en aménagement rural. Ministère de l'agriculture , Paris, France.
- Schlosser, F.** (1988). Eléments de mécanique des sols. Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées.
- Sherard, J. L.** (1984). Filters for silts and clays. Journal of Geotechnical Engineering, 110(6), 701-718

Dispositifs de protection des barrages en terre

Sherard, J. L., & Dunnigan, L. P. (1985). Filters and leakage control in embankment dams. In Seepage and leakage from dams and impoundments (pp. 1-30). ASCE.

Varlet ,H. (1966). Barrages réservoirs. Barrages en terre et en enrochements. Tome 3. Eyrolles.Paris.