Nouvelle conception des drains dans les barrages en terre homogène de petite et moyenne dimensions

par J. Dunglas
Docteur-Ingénieur
Ingénieur du Génie Rural,
des Eaux et des Forêts

et D. Loudière
Ingénieur du Génie Rural,
des Eaux et des Forêts

Position du problème

Depuis une quinzaine d'années, de nombreuses réserves d'eau à buts agricoles et touristiques ont été établies en France. Elles ont été pour la plupart obtenues au moyen de barrages en terre de structure homogène, de hauteur inférieure à 30 m. Les plus importants ont été édifiés sous le contrôle du ministère de l'Agriculture ou de Sociétés d'économie mixte.

Malgré leur dimension modeste, on a toujours cherché à concevoir ces ouvrages aussi soigneusement que possible par les méthodes classiques. Dans toute la mesure du possible, les chantiers ont fait l'objet d'un contrôle soigneux portant sur la densité du remblai mis en place et sa teneur en eau.

Dans leur grande majorité, ces ouvrages sont de type homogène avec drain aval en tapis, tranchée d'ancrage et couverture amont en enrochements posés sur filtre. Beaucoup de ces ouvrages donnent entière satisfaction; il apparaît néanmoins maintenant à la lumière de l'expérience que, dans un bon nombre de cas, ce type de conception, quoique valable selon les critères classiques, s'applique en fait assez mal dans la pratique.

La première difficulté tient au prix assez élevé des matériaux filtrants dans certaines régions; le coût du drain aval représente alors une part notable du coût total de l'ouvrage.

La deuxième difficulté réside dans le fait que le drain aval fonctionne souvent mal et même parfois pas du tout. Il est alors courant d'observer, sur le talus aval à différents niveaux, de nombreux suintements, les fuites par le drain restant à un niveau faible ou négligeable.

Ces défauts, biens connus des spécialistes, sont dus à l'hétérogénéité et à l'anisotropie du remblai en matière de conductibilité hydraulique. L'hétérogénéité se présente le plus souvent sous la forme de zones horizontales plus perméables que les autres, elle joue à l'échelle du décimètre et du mètre. L'anisotropie fait apparaître le terrain plus perméable dans le sens horizontal que dans le sens vertical. A la limite, la distinction entre les deux facteurs est difficile à faire car l'anisotropie est le plus souvent le résultat d'une hétérogénéité à un niveau de dimension inférieur.

Théoriquement, on peut améliorer l'homogénéité en grande masse par un meilleur contrôle de l'origine des terres et du processus de compactage. L'hétérogénéité au niveau de la couche compactée et l'anisotropie qui en résulte est beaucoup plus difficile à combattre, car elle est liée à la nature même de l'opération de compactage dans laquelle la force agissante est un poids en surface. Quelques mesures, encore trop rares, ont pu être faites sur des remblais de barrages. Elles ont montré que, à l'échelle de 10 à 30 cm, la perméabilité horizontale K_H, était supérieure à la perméabilité verticale K_V, le rapport K_H/K_V pouvant, dans certains cas, presque atteindre 100, des valeurs de 10 à 30 étant courantes.

Le phénomène dépend de la nature du sol, du type de rouleau et de la réalisation pratique du chantier. Une bonne reprise superficielle de la dernière couche compactée avant épandage et roulage peut diminuer l'importance du phénomène. On manque encore de données expérimentales suffisantes, et des mesures systématiques sont envisagées sur des prochains chantiers pour mieux cerner le problème.

La troisième difficulté est la quasi impossibilité de bien

Article published by SHF and available at http://www.shf-lhb.org or http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1973033

surveiller le compactage sur les nombreux petits chantiers réalisés par des entreprises locales souvent peu qualifiées pour ce genre d'opération. Nous pensons que, dans ce cas, la meilleure solution est d'intégrer dans le projet le fait que le compactage ne sera pas réalisé suivant les conditions optimales et de concevoir et de calculer l'ouvrage en conséquence.

Pour tourner ces difficultés, l'une des démarches les plus efficaces est de modifier la forme et la position du drain aval. Cette idée n'est pas nouvelle. On trouve dans les ouvrages classiques, en particulier sous la plume d'auteurs américains, des exemples d'utilisation de drains de différentes formes, en particulier verticaux, obliques ou du type bande horizontale.

Dans notre cas, le drain oblique, peu économique et plus difficile à mettre en place, n'avait guère d'avantages. Par contre, le drain vertical capable de couper les infiltrations privilégiées le long de strates horizontaux et le drain-bande où la masse de matériaux filtrants est sensiblement réduite, offraient des possibilités intéressantes.

Etudes en cours et les solutions envisagées

Compte tenu de ces éléments, les études en cours portent sur :

— l'examen des ouvrages existants et l'établissement de statistiques sur l'anisotropie de perméabilité;

— l'analyse sur modèle du comportement des différents types de structure de drain.

⁂

Un essai en vraie grandeur de drain vertical est envisagé sur un ouvrage expérimental avec contrôle précis des conditions de percolation.

Les résultats donnés ci-dessous résultent pour l'essentiel de l'analyse sur modèle. Deux grands types de drains ont été étudiés :

a) Le drain-bande de 1 à 4 m de long posé au contact remblai-fondation dans une zone comprise entre la projection de la crête et celle du milieu du talus aval. Ce drain doit être relié au massif de pied et au fossé collecteur par des drains longitudinaux parallèles à l'axe du thalweg.

b) Le drain vertical de faible épaisseur (0,5 à 0,60 m) mis en place très économiquement à la pelle ou à la trancheuse par creusement de tranchées successives de 1 à 2 m de profondeur dans le remblai fraîchement compacté et remplissage par matériaux perméables. Il est très difficile, sinon impossible, avec ce mode de mise en place très économique, de constituer des structures drainantes complexes avec couches filtrantes successives. La granulométrie du drain doit donc être d'emblée compatible avec celle du massif. En cas de difficultés, des solutions peuvent toutefois être imaginées en utilisant, par exemple, des filtres fabriqués industriellement.

Pour des raisons de commodité, en particulier de facilité de mise en œuvre et de souplesse d'emploi, de coût réduit, enfin de rapidité de calcul, on a utilisé un modèle mathématique mis en œuvre sur ordinateur.

Modèle mathématique utilisé

C'est un modèle très classique basé sur la méthode numérique des éléments finis. Le point de départ est l'équation de Laplace à partir de laquelle on se ramène à un système d'équations linéaires. Un réseau de deux familles de lignes brisées engendre une série de quadrilatères eux-mêmes divisés en un certain nombre de triangles élémentaires. L'équation de base consiste à écrire à partir de la relation de Darcy que la somme des débits en un nœud est nulle.

L'utilisation de ce modèle nécessite l'emploi d'un ordinateur de grande capacité. La détermination de la ligne de saturation présente certaines difficultés puisqu'elle apparaît comme une ligne brisée dont les points anguleux sont obtenus par interpolation entre nœuds voisins, le potentiel étant légèrement inférieur à la cote pour le premier et supérieur pour le second. La recherche se fait par approximations successives; trois à six itérations sont nécessaires en moyenne.

Le programme a été établi au Centre d'études de mécanique des roches de l'Ecole nationale supérieure des Mines pour l'étude des nappes. Il permet de traiter les problèmes plan ou à symétrie de révolution en régime permanent.

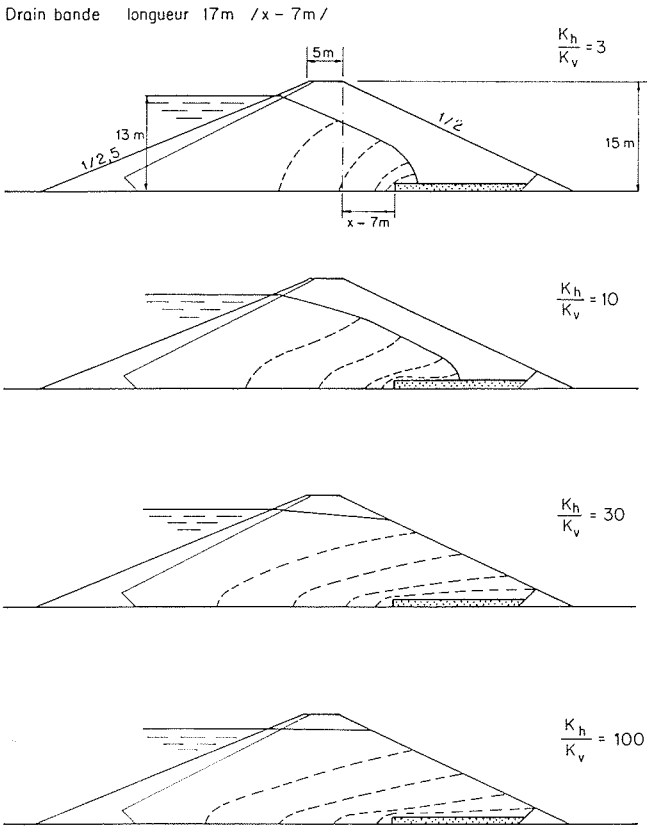
L'anisotropie s'introduit au niveau du coefficient de Darcy représenté par une matrice symétrique à quatre composantes (problèmes plans); les directions principales de la matrice peuvent être orientées de façon quelconque. Dans notre cas, ces directions sont confondues avec la verticale et l'horizontale, et la matrice perméabilité est simplement définie par les deux valeurs principales K_V et K_H. Le rapport K_H/K_V représente le degré d'anisotropie.

Calculs réalisés

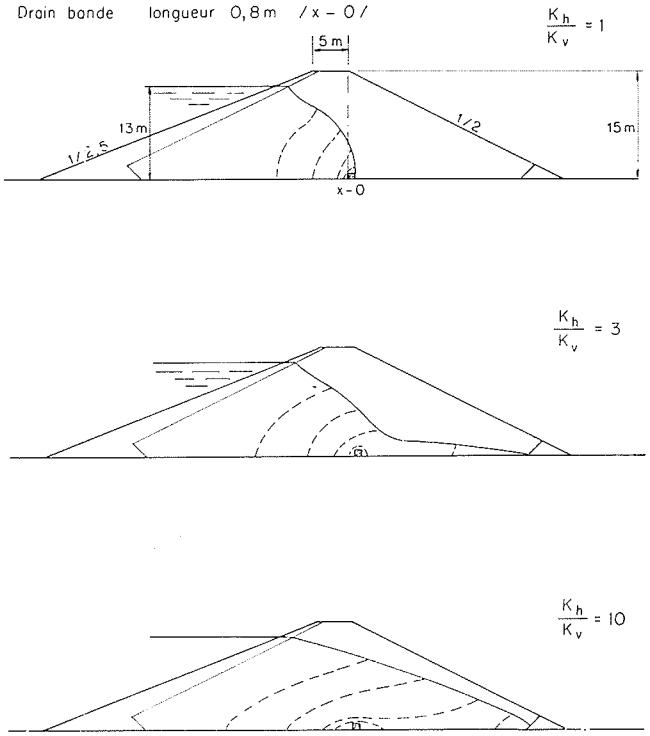
Le profil de base utilisé a été celui d'un barrage en terre homogène de 15 m de haut, de 5 m de largeur en crête avec un talus aval de pente 1/2, un talus amont de pente 1/2 recouvert d'une protection d'enrochements telle que le parement ait une pente finale de 1/2,5. La hauteur d'eau supposée à l'amont a été de 13 m. Sur ce schéma général, le comportement de 9 structures drainantes a été analysé (fig. 1 à 9).

Le calcul a été mené dans le cas d'une fondation totalement imperméable et, dans un but de simplification, aucune tranchée d'ancrage n'a été prévue.

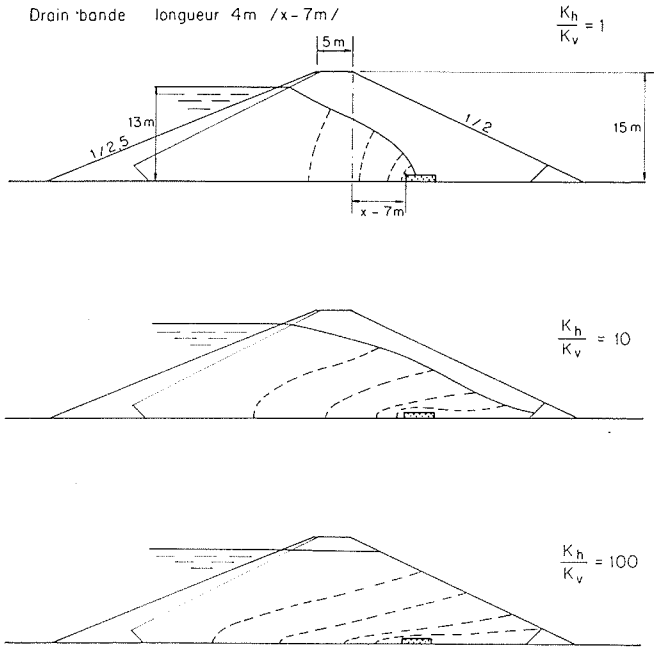
Les neuf types de drains ont été étudiés pour des valeurs du coefficient d'anisotropie allant de 1 à 100. Les positions de la ligne de saturation et les équipotentielles ne dépendent que de la valeur du rapport K_H/K_V et les valeurs absolues de ces coefficients n'interviennent pas sur


Drain bande longueur 17m /x - 7m/
5m
$\frac{K_h}{K_v} = 3$
13m
1/2,5
1/2
15m
x - 7m
$\frac{K_h}{K_v} = 10$
$\frac{K_h}{K_v} = 30$
$\frac{K_h}{K_v} = 100$

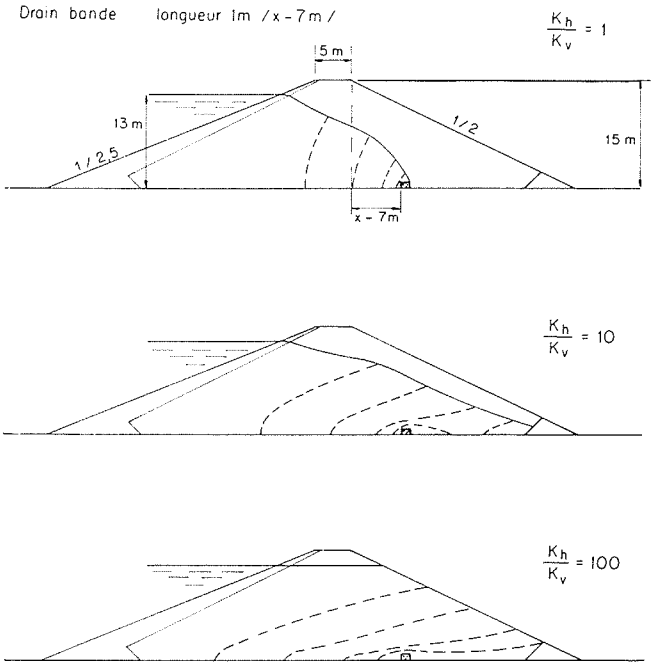
1/


Drain bande longueur 0,8m /x - 0/
5m
$\frac{K_h}{K_v} = 1$
13m
1/2,5
1/2
15m
x - 0
$\frac{K_h}{K_v} = 3$
$\frac{K_h}{K_v} = 10$

3/

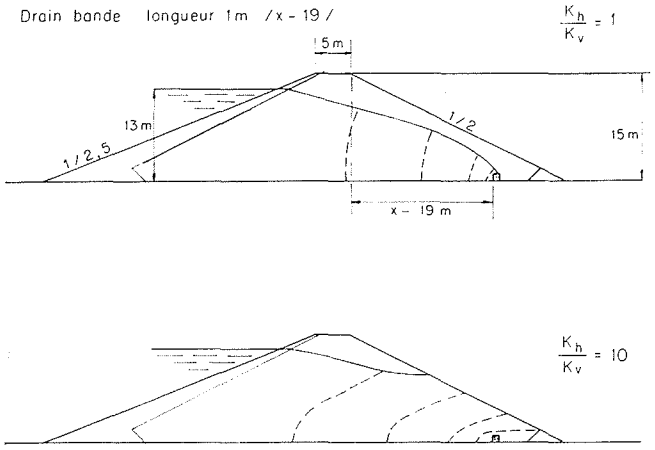

Drain bande longueur 4m /x - 7m/
5m
$\frac{K_h}{K_v} = 1$
13m
1/2,5
1/2
15m
x - 7m
$\frac{K_h}{K_v} = 10$
$\frac{K_h}{K_v} = 100$

2/


Drain bande longueur 1m /x - 7m/
5m
$\frac{K_h}{K_v} = 1$
13m
1/2,5
1/2
15m
x - 7m
$\frac{K_h}{K_v} = 10$
$\frac{K_h}{K_v} = 100$

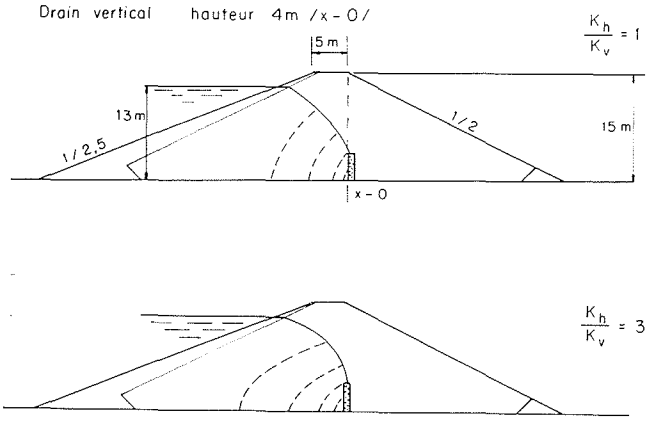
4/

Drain bande longueur 1 m /x - 19 /

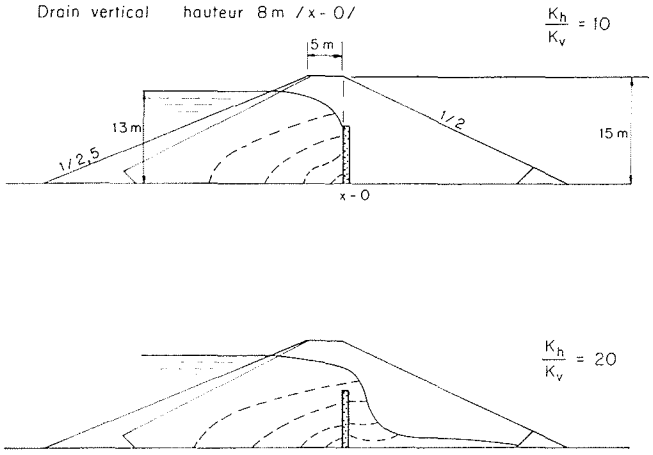


5/

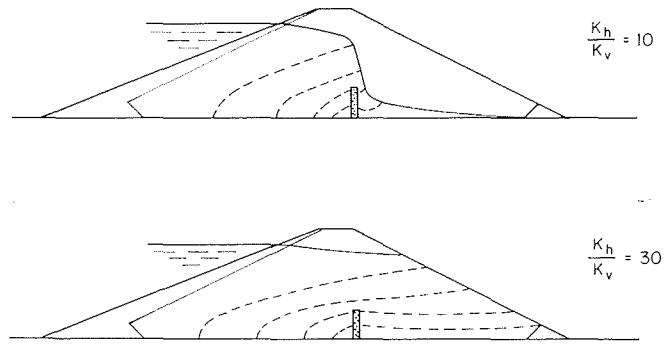
Drain vertical hauteur 4 m /x - 0 /



Drain vertical hauteur 8 m /x - 0 /

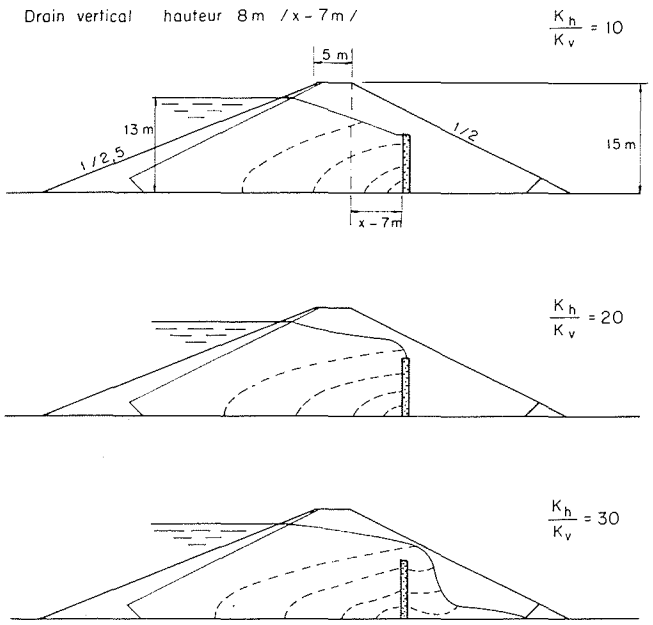


6/



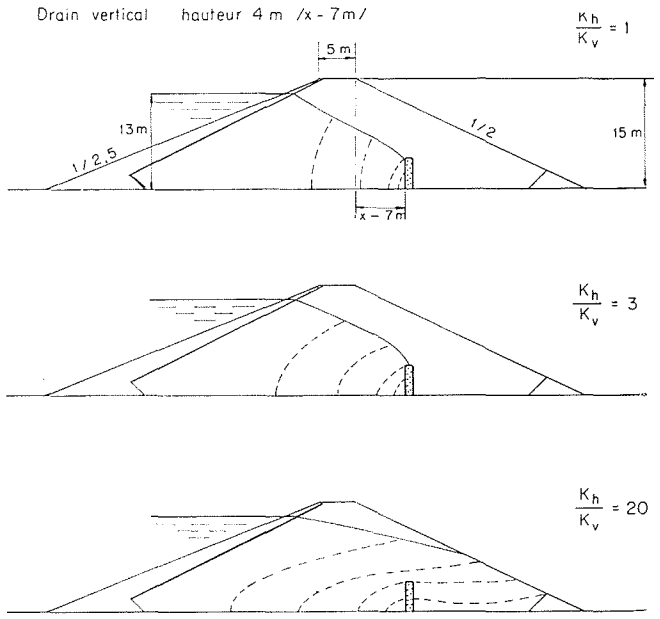
7/

Drain vertical hauteur 8 m /x - 7 m /



8/

Drain vertical hauteur 4 m /x - 7 m /



9/

le dessin de ces lignes. Pour des raisons de clarté, on s'est contenté d'y porter en tireté les équipotentielles H = 10 m, 7 m, 4 m et 2 m.

Résultats

1. — En terrain isotrope tous les systèmes de drain sont efficaces et rabattent correctement la ligne de saturation. Quoique valable, le drain-bande de 0,80 × 0,80 m doit être considéré comme une solution minimale.

2. — Pour des anisotropies comprises entre 3 et 10, les drains-bandes cessent d'être suffisants. Par contre, le drain tapis, quoique sérieusement envahi vers l'aval, est encore utilisable. Tous les types de drains verticaux donnent satisfaction, mais le drain de 4 m de haut, quelle que soit sa position, est à la limite de ses possibilités.

3. — Pour des coefficients d'anisotropie de 10 à 30, les drains horizontaux deviennent tous inefficaces. Le dessin est typique dans le cas du tapis drain classique avec un rapport K_H/K_V de 30.
Les drains verticaux de faible hauteur n'apportent eux-mêmes aucune amélioration et il faut faire appel au drain de 8 m de hauteur pour avoir une interception suffisante.

4. — Pour des coefficients d'anisotropie supérieurs à 30, il faut des drains verticaux dont la hauteur atteint pratiquement le niveau moyen des eaux et obligatoirement situés de ce fait au droit du bord aval de la crête.

Conclusions

Pour des coefficients d'anisotropie réduits, les techniques du drain bande et du drain vertical de faible hauteur sont valables. Ils peuvent permettre des économies importantes de matériaux filtrants et devraient donc se révéler intéressants pour les ouvrages petits et rustiques où l'on recherche systématiquement les prix les plus bas possible.

Pour des coefficients d'anisotropie supérieurs à 10, la seule solution valable est le drain vertical haut, judicieusement placé. Cette solution s'impose dans tous les cas d'ouvrages où l'on craint, du fait de la nature du sol, du type de compactage ou de l'insuffisance du contrôle, une stratification aboutissant à une forte anisotropie en grande masse et à des cheminements horizontaux préférentiels. Le drain vertical peut également amener une certaine économie de matériau.

En résumé donc, l'étude théorique confirme que les principes d'utilisation du drain-bande (strip-drain) et du drain vertical (chimney drain) déjà assez largement utilisés, en particulier aux Etats-Unis pour des ouvrages importants et parfois assez anciens (Sherburne Lakes Dams, Montana 1916, Mammoth Pool Dam Californie 1958), sont parfaitement adaptables à nos petits barrages.

Considérée à ce niveau, notre étude est encore limitée. Il est en effet probable que, dans nombre de circonstances, il sera nécessaire de maintenir un drainage horizontal à la limite remblai-fondation pour contrôler les conditions hydrauliques dans les soubassements du barrage. Les économies de matériaux filtrants peuvent donc ne pas être aussi importantes qu'on pourrait se l'imaginer. Mais le gain de sécurité apporté par les drains verticaux est considérable.

A condition de ne comporter qu'un seul matériau, un drain vertical mince est facile à réaliser économiquement. Un organe de ce type a été mis en place sans la moindre difficulté à la pelle hydraulique sur le barrage de Payolle dans les Hautes-Pyrénées, par tranches successives de 1,50 à 2 m de profondeur. Le problème est plus difficile à résoudre quand les conditions de filtre ne sont pas respectées. Des essais avec des matériaux synthétiques sont prévus dans un proche avenir.

Le programme de calcul utilisé permet donc une conception rationnelle du système de drainage d'un barrage; mais il est nécessaire, avant d'entamer l'étude d'avoir une idée, même approximative, de la valeur réelle des perméabilités dans les différentes directions. Pour cela, des essais préalables en vraie grandeur avec des engins analogues à ceux qui seront employés pour édifier l'ouvrage sont nécessaires. De tels essais préliminaires peuvent s'envisager pour des barrages importants; ils apparaîtront le plus souvent hors de question pour le plus grand nombre des petites digues.

Dans chaque cas particulier, l'ingénieur devra donc se faire une idée à partir des essais de laboratoire et, compte tenu des réalisations existantes dans la région, des degrés d'anisotropie et d'hétérogénéité auxquels il peut s'attendre. A partir de là, le calcul numérique doit lui permettre en un temps très court et pour un prix acceptable, de choisir la solution optimisant suivant les besoins, la sécurité ou l'économie.

Bibliographie

LOUDIERE (D.). — Eléments théoriques sur le drainage dans les barrages en terre. Note technique interne. Ministère de l'Agriculture, C.T.G.R.E.F., parc de Tourvoie, 92160 Antony.

SHERARD (J. L.), WOODWARD (R. J.), GIZIENSKI (S. F.) et CLEVENGER (W. A.). — « Earth and Earth Rock Dams ». *John Wiley and Sons,* N. Y. (1967).

Voir la Discussion à la page suivante

Discussion

Présidents : MM. Boreli et P. Plichon

M. le Président remercie vivement M. Dunglas pour son exposé très concret qui intéressera de nombreux ingénieurs. Il ouvre ensuite la discussion.

M. G. Post (Bureau d'étude Coyne et Bellier) intervient en ces termes :

M. Dunglas a mis en évidence le rôle de l'anisotropie due au compactage des terres par couches minces. Pour ma part, je suis convaincu qu'il faut considérer cette anisotropie comme étant la règle sur tous les ouvrages, et que la perméabilité horizontale peut parfois être 100 fois plus forte que la perméabilité verticale, non seulement en raison du mode de compactage mais aussi des variations de teneur en eau et de densité des terres.

A noter que le perméamètre radial permet de mesurer correctement la perméabilité horizontale en reproduisant, dans le moule annulaire, le compactage par couches minces.

M. Londe (Coyne et Bellier) apporte les précisions suivantes :

Dans les réseaux d'écoulement que M. Dunglas a présentés, le drain (qu'il soit horizontal, bande ou vertical) est maintenu au potentiel zéro. Or, cette hypothèse n'est vérifiée que si la conductivité hydraulique du drain est très supérieure à celle du massif homogène. Il faut, en effet, que l'eau collectée par le drain s'évacue sans charge. Lorsqu'on fait le calcul de cette évacuation, calcul compliqué par le fait qu'en général, l'écoulement dans le drain a nécessairement une composante normale au plan de figure (notamment dans le cas des drains bandes ou des drains verticaux non prolongés par un tapis continu), on trouve qu'il faut des drains plus perméables qu'on ne le croit couramment. Un calcul de ce genre a été fait par R. E. Gibson et G. C. Shefford (*Géotechnique*, septembre 1968).

Il est recommandé d'être très prudent dans l'interprétation numérique des réseaux d'écoulement. Mais, cette précaution étant prise, ils montrent clairement l'avantage du drain vertical (ou en tout cas central) qu'il convient donc d'employer dans les petits barrages homogènes comme il est maintenant systématiquement employé dans les grands.

M. le Président Boreli souligne les limites d'emploi des digues en terre homogènes ; l'exposé de M. Dunglas montre bien comment on peut étendre leurs applications moyennant l'utilisation de dispositions assez simples.

En réponse aux deux dernières interventions, M. Dunglas s'exprime comme suit :

1. — Nous sommes amenés à construire ces digues homogènnes tout simplement pour des raisons économiques ; pour arriver au moindre prix, il faut utiliser les terres disponibes quasiment sur place et dans les conditions les moins compliquées possibles. Il s'agit, dans la plupart des cas, de limons argileux relativement fins, il en résulte des risques non négligeables de glissements de terrain à longue échéance : tous les spécialistes de mécanique des sols savent, en effet, que de tels ouvrages tiennent surtout par leur cohésion et la cohésion est une propriété qui n'est pas pérenne ou, tout au moins, qui risque de ne pas l'être, Les diagrammes projetés par le Professeur Thirriot au début de la session, ont bien montré les nombreux accidents qui se sont produits sur ce genre d'ouvrage. Le risque peut être contrebalancé par un accroissement approprié du coefficient de sécurité minimum accepté.

2. — En ce qui concerne les drains, on a supposé, dans les calculs qui ont été faits, qu'ils fonctionnaient entièrement à la pression atmosphérique ; c'est là une hypothèse favorable. Nous n'avons observé que rarement de très gros débits de fuite : ils avoisinent toujours 2 à 3 l/s au maximum. Il ne semble donc pas qu'on risque de graves difficultés du fait de fuites importantes ; ceci est essentiellement dû d'ailleurs au fait qu'il s'agit d'ouvrages réalisés en matériaux relativement fins et homogènes en grande masse. Mais, il est certain que l'évacuation du drain est un problème que l'ingénieur doit avoir constamment à l'esprit.

M. le Président remercie M. Dunglas et toutes les personnes qui ont animé la discussion. Il donne ensuite la parole à M. Post pour l'exposé de la communication qu'il a établie en collaboration avec M. P. Guerber.