

Réparation de digues en terre au moyen de parois moulées dans le sol

par R. Chadeisson

Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées
Ingénieur en Chef
à Solétanche-Entreprise

La stabilité des digues en terre se trouve parfois compromise à la suite de phénomènes de dissolution ou d'érosion, qui modifient progressivement le corps de ces digues ou le sol sur lequel elles sont fondées.

Il faut alors régénérer l'ouvrage et sa fondation le plus économiquement possible, en perturbant le moins possible l'exploitation de la retenue.

Les exemples que nous allons décrire illustrent une solution élégante, qui consiste à substituer une « paroi continue » à l'ancien dispositif d'étanchéité.

La « paroi continue » utilisée doit être suffisamment déformable pour pouvoir suivre les divers mouvements de la digue sans qu'il y ait apparition de fissures : elle est donc toujours réalisée en « béton plastique » ou en « coulis ».

Parois en « béton plastique »

Description.

Une paroi en « béton plastique » est obtenue en creusant une tranchée sous la protection d'une boue de forage, puis en remplaçant cette boue de forage par un béton spécial contenant :

- peu de ciment (60 à 100 kg/m³);
- peu de granulats (900 à 950 litres/m³);
- un peu de bentonite (15 à 25 kg/m³).

Sous une étreinte latérale de l'ordre de 1 kg/cm², un tel béton peut subir des déformations de 10 % sans se fissurer.

On doit remarquer que les granulats pourraient être supprimés (comme dans la paroi en « coulis » que nous

verrons ci-dessous), car ils sont onéreux et inutiles. En effet — étant enrobés d'une épaisse couche de coulis — ils ne peuvent jouer aucun rôle dans la résistance mécanique, alors qu'ils diminuent la déformabilité.

Exemple de réalisation.

Parmi les digues réparées au moyen d'une paroi en « béton plastique », nous citerons — à titre d'exemple — celle de Balderhead en Grande-Bretagne (fig. 1).

Cette digue, de 48 m de hauteur, est fondée partiellement sur des argiles schisteuses dures, partiellement sur une formation d'argile à blocaux. Son étanchéité devait être assurée à l'origine par un noyau central en argile à blocaux compactée, prolongé vers le bas par un parafouille en béton et un rideau d'injection.

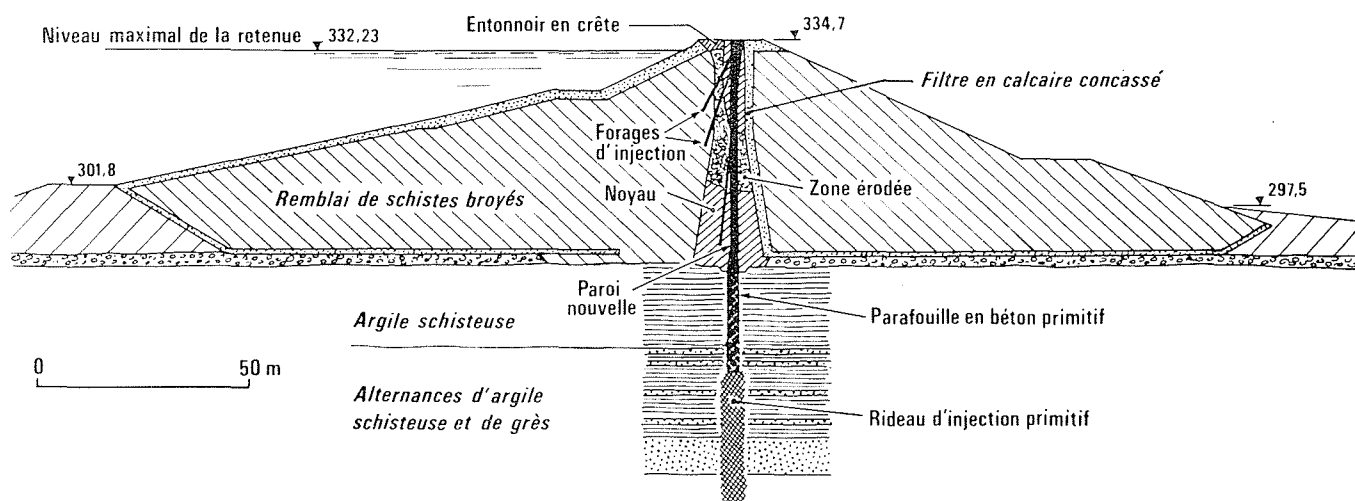
Durant l'année 1966, à retenue pleine, le débit des fuites a sensiblement doublé (passant de 25 à 50 l/s), puis l'eau des résurgences est devenue limoneuse, enfin on a observé des affaissements et des fontis atteignant 2,50 m en divers points de la crête de la digue.

Une reconnaissance a montré que le noyau d'argile s'était fissuré, et avait été érodé.

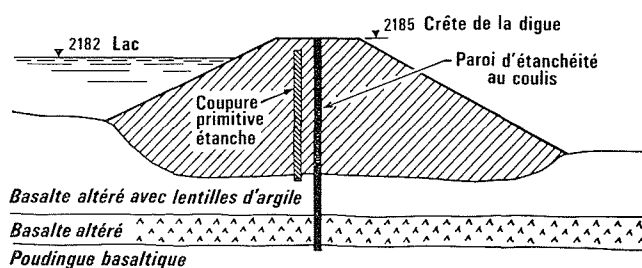
La réparation a consisté :

- à redonner une certaine cohésion au noyau par quelques injections;
- puis à réaliser une paroi en « béton plastique » descendant jusqu'au parafouille primitif en béton.

La difficulté, que ce chantier dut vaincre, fut d'obtenir un bon raccordement entre la paroi et le parafouille primitif en béton à 46 m de profondeur : le défaut de verticalité ne devait pas dépasser 0,5 %. En fait, les précautions prises ont été telles que l'on a pu obtenir une précision encore meilleure.

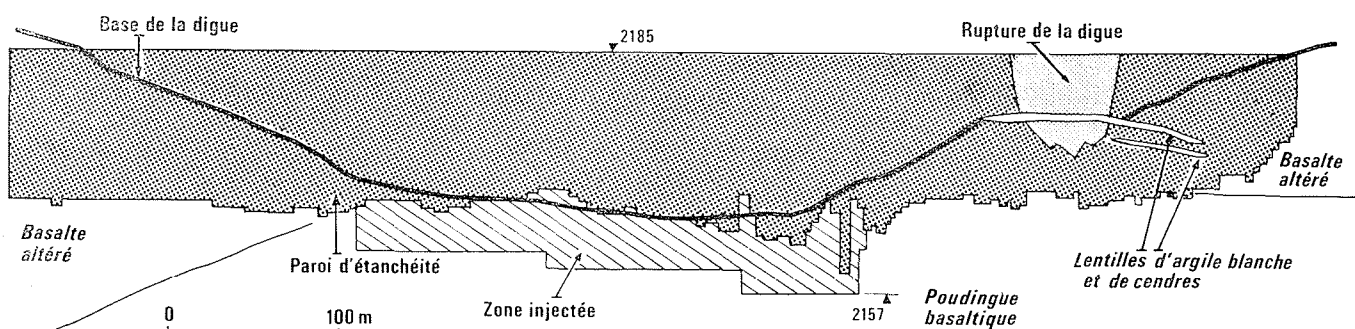


1/

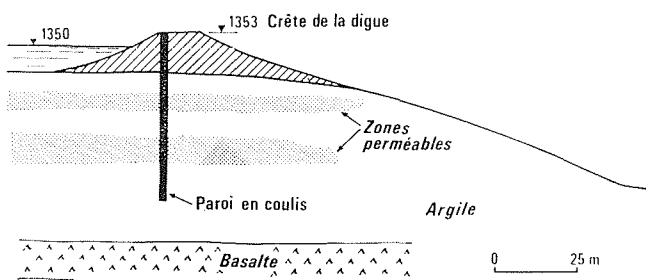


2/

3/



4/



5/

1/ Digue de Balderhead (Grande-Bretagne). Coupe transversale.

2/ Paroi « en coulis » exécutée par panneaux alternés (vue en plan).

3/ Digue de Laguna (Mexique). Coupe transversale.

4/ Digue de Laguna (Mexique). Coupe longitudinale.

5/ Digue de Tenango (Mexique). Coupe transversale.

Parois en « coulis »

Description.

Une paroi en « coulis » est obtenue, elle aussi, en creusant une tranchée sous la protection d'une boue de forage, mais cette boue de forage est *autodurcissable*, ce qui rend inutile toute substitution ultérieure par un autre matériau.

La boue autodurcissable est donc un fluide :

- qui conserve durant quelques dizaines d'heures l'allure thixotrope d'une boue de forage, sa cohésion restant faible (quelques dizaines de g/cm^2);
- mais qui durcit ensuite progressivement sans décanter, constituant ainsi un matériau étanche très déformable (pouvant donc suivre les déformations éventuelles de la digue), de résistance comprise entre 1 et $10 kg/cm^2$ suivant la composition du fluide.

Cette boue autodurcissable sans granulats, qui a été mise au point et brevetée par le laboratoire de Solétanche Entreprise, est désignée plus simplement par le nom de « coulis », parce qu'elle a sensiblement l'aspect d'un coulis d'injection.

Généralement on exécute la perforation par panneaux alternés (fig. 2).

Le panneau ($n + 1$) étant creusé, alors que le « coulis » remplissant les panneaux (n) et ($n - 2$) est encore fluide, il y a interpénétration parfaite des remplissages de tous ces panneaux, et absence totale de joint. Une telle paroi est parfaitement continue.

Exemples de réalisations : travaux exécutés au Mexique.

● DIGUE DE LAGUNA :

En octobre 1969, une brèche d'une cinquantaine de mètres de largeur s'ouvrit brutalement dans la digue de Laguna (fig. 3).

Il s'agissait d'une digue en matériaux argileux, de 18 m de hauteur en son centre et de 750 m de longueur, qui — auparavant — n'avait jamais posé de problème, à l'exception de fuites assez importantes.

La cause du sinistre était une lentille de matériau basaltique particulièrement décomposé, située juste sous la digue, et qui s'était progressivement ramollie (fig. 4).

La réparation consista à nettoyer les dernières traces de la lentille molle, à reconstituer le corps de la digue au droit de la brèche, puis à réaliser, tout le long de la digue, une paroi continue en coulis de $13\ 000 m^2$ de surface et d'une profondeur maximale de 21 m.

Depuis ces travaux, l'étanchéité est parfaite en rive gauche où la paroi a été descendue jusqu'à un substratum étanche.

● DIGUE DE TENANGO :

La digue de Tenango est longue de plusieurs kilomètres. Seule, la partie située en rive droite nécessitait un confortement rapide parce que les débits de fuite y étaient passés de 4 l/s à 44 l/s entre 1966 et 1970.

On ne pouvait prévoir une étanchéité totale, car il n'existait malheureusement pas de substratum étanche. On a donc exécuté une paroi continue en coulis de profondeur limitée, longue de 500 m, d'une surface de $10\ 670 m^2$ (fig. 5).

Depuis ces travaux, les résurgences qui se produisaient

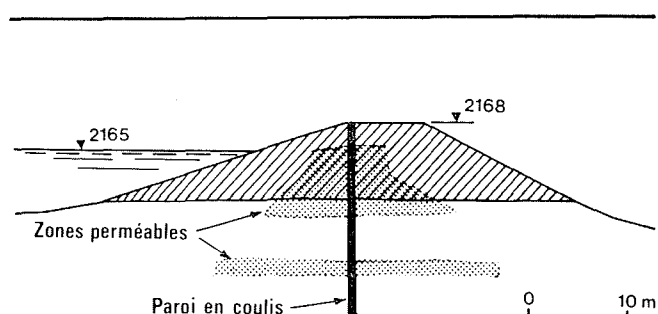
au pied immédiat de la digue ont disparu, et la paroi a permis d'améliorer la sécurité en augmentant les longueurs de cheminement des infiltrations. Mais il reste un débit résiduel important (24 l/s) probablement dû à un contournement de la paroi à ses deux extrémités.

● DIGUE DE LOS REYES :

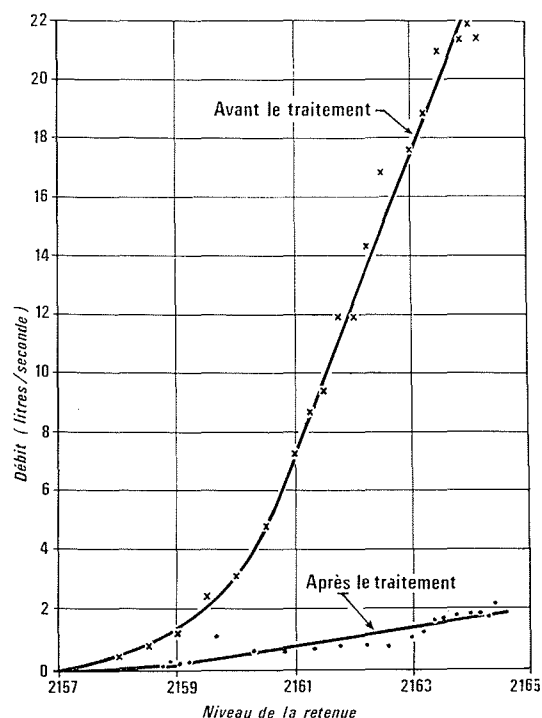
Cette petite digue, de 8 m de hauteur en son centre, longue de 500 m, présentait des fuites de 22 l/s.

D'après les sondages, ces fuites provenaient, en partie de circulations à travers la digue, en partie, de circulations à travers le sol de fondation. Mais aucun passage ne fut détecté au-delà de 15 m de profondeur (comptés à partir du couronnement (fig. 6).

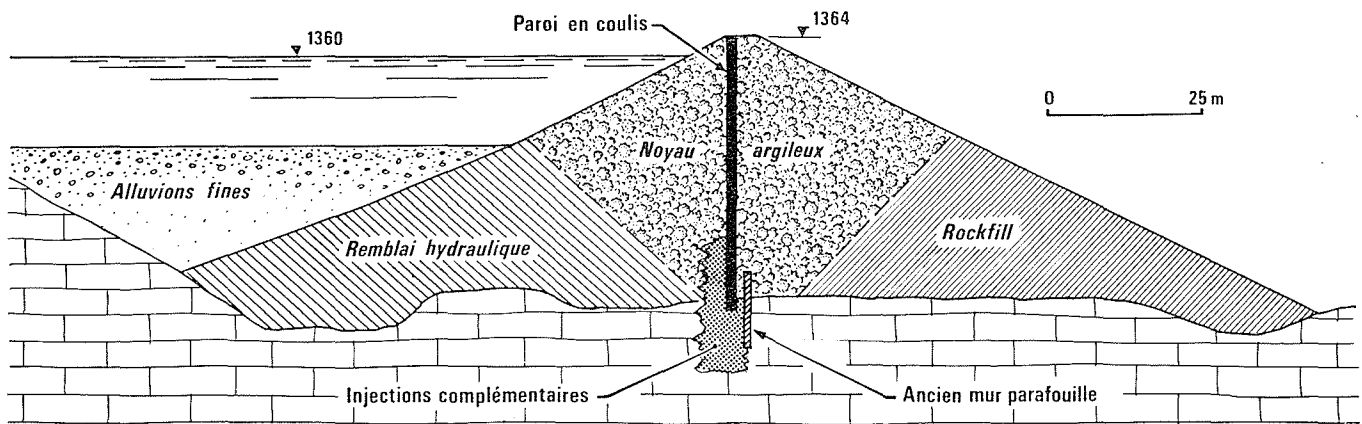
Une paroi en coulis de $5\ 600 m^2$ a permis de réduire les fuites à 2 l/s (fig. 7).



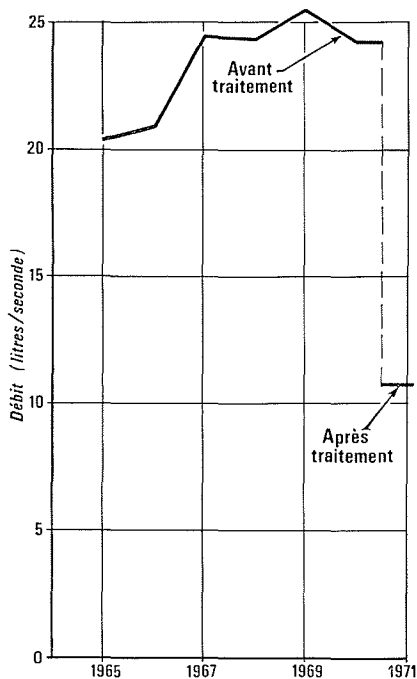
6/ Digue de Los Reyes (Mexique). Coupe transversale.



7/ Digue de Los Reyes (Mexique). Comparaison des débits de fuite avant et après traitement.



8/ Digue de Nexapa (Mexique). Coupe transversale.



9/ Digue de Nexapa (Mexique). Comparaison des débits de fuite avant et après traitement.

● DIGUE DE NEXAPA :

Haute d'une cinquantaine de mètres, la digue Nexapa repose, en son centre, sur un calcaire étanche, ailleurs, sur des couches argileuses assez perméables (fig. 8).

Les fuites atteignaient 24 l/s, débit à la rigueur acceptable pour une digue aussi haute. Le risque provenait plutôt de l'entraînement de particules solides.

On n'a donc pas cherché à annuler les fuites, mais seulement à arrêter l'érosion : la paroi a été limitée aux zones les plus dangereuses de la digue et, en particulier, on n'a

réalisé aucun travail confortatif sur les rives. La surface de la paroi n'a pas dépassé 9 700 m².

On peut noter que le lac était rempli aux deux-tiers au moment des travaux, et que cela n'a empêché ni le creusement de la tranchée, ni le remplissage avec du « coulis ».

Après ces travaux, les fuites ont été réduites à 10,7 l/s, et les entraînements de particules ont disparu (fig. 9).

Conclusion

Jusqu'à ces dernières années, les « parois continues » étaient utilisées pour réaliser des écrans étanches à travers les sols naturels (enceintes étanches de fouilles provisoires, parafeuilles prolongeant vers le bas les noyaux de barrages, parafeuilles des digues latérales de fleuves, etc.).

Les exemples que nous venons de présenter montrent que ces « parois continues » peuvent être utilisées avec autant de succès à travers des digues nécessitant des travaux confortatifs.

Rien n'empêcherait, semble-t-il, de concevoir des digues neuves admettant de telles « parois continues » comme organe d'étanchéité définitif.

Discussion

Présidents : MM. J.-C. VAN DAM et J. FLORENTIN

M. le Président VAN DAM remercie M. CHADEISSON d'avoir si clairement exposé de nombreux exemples de « réparation » d'un grand intérêt. Il ouvre ensuite la discussion.

M. l'Inspecteur Général A. MAYER décrit sommairement la réparation réalisée, il y a quelques années, dans une digue de 15 m de hauteur dans le Massif Central, au moyen d'une « paroi moulée avant la lettre ».

Il s'agissait, dit-il, de construire une digue pour la réalisation d'un bassin dans une station de sports d'hiver. Les travaux n'avaient pas pu être faits en un été, comme il était prévu, à cause du mauvais temps, on avait dû les arrêter et les reprendre à la saison suivante. La reprise n'avait pas été bien faite, si bien que, lorsqu'on a rempli la retenue, des résurgences inadmissibles ont apparu à l'aval. Pour y pallier, nous avons réalisé une paroi moulée en faisant simplement une tranchée avec une pelle « rétro » à travers la zone de reprise et en la remplissant avec l'argile qui avait servi à faire le barrage. Ceci a conduit à faire une tranchée de l'ordre de 7 m de profondeur et on n'a jamais plus entendu parler des fuites.

M. POST intervient ensuite en ces termes :

M. CHADEISSON nous a exposé des techniques très intéressantes de réparation de barrages en terre au moyen de parois moulées dans le sol. Dans certains cas, les réparations ont été faites par injection et claquage du noyau, comme ce fut le cas pour les barrages de Hyttejuvet et de Balderhead. Je suis convaincu que ces techniques d'injection doivent être maniées avec la plus grande prudence. La fracturation se produisant dans un champ de contraintes mal connu, la direction des claquages et le cheminement du coulis sont imprévisibles. De plus, le coulis présente souvent des caractéristiques de déformabilité sensiblement différentes de celles du noyau dont les déformations ne sont pas achevées.

M. CHADEISSON répond que, dans tous les exemples présentés, la réparation a été essentiellement obtenue au moyen de parois moulées, le claquage par injections étant réservé à des zones de faibles surfaces.

A Nexapa, on a effectivement traité la partie basse par injection en essayant de « claquer » le terrain, mais la direction des claquages n'avait que peu d'importance : en effet ces claquages étaient destinés à provoquer une consolidation du terrain par expulsion d'eau, et non à créer par eux-mêmes un écran étanche. C'est pourquoi l'injection de chaque passe des forages a été faite en plusieurs phases : on a, en quelque sorte, utilisé le claquage comme un vérin plat pour comprimer le terrain et lui faire perdre son eau ; au bout d'un certain temps, comme il y avait déjà eu quelques pertes d'eau, la pression avait diminué, on refaisait alors une nouvelle injection de volume limité ; et on recommençait ainsi plusieurs fois.

A Balderhead, par contre, on a réalisé des injections en évitant le plus possible les claquages : le but du traitement était en effet de redonner au noyau sa cohésion et son imperméabilité initiales, simplement en rebouchant les vides.

A une question complémentaire sur le risque de colmatage des drains lors des injections du noyau d'une digue, M. CHADEISSON répond qu'à Balderhead, où l'on injectait près du filtre aval, on lavait sans arrêt ce filtre à partir de quelques forages spéciaux, pour que le filtre ne se colmate pas.

Abstract

Restoration of earth dykes with walls cast in the ground

Earth dykes can be reconditioned by replacing the original sealing arrangements with a 'continuous plastic concrete wall' or a 'continuous grout wall'.

A 'plastic concrete' wall is formed by excavating a trench with drilling mud for protection and then replacing the mud with special concrete capable of withstanding deformation up to 10% without cracking.

● EXAMPLE:

Balderhead dyke, United Kingdom (Fig. 1).

A 'grout' wall is formed in the same manner with drilling mud, except that the mud is *self-hardening*, i.e. hardens gradually without settling out, thus making its subsequent replacement by another material unnecessary.

As a general rule, every other panel is perforated (see Fig. 2).

● EXAMPLE 1

Laguna dyke, Mexico (Fig. 5)—A 50 m breach which formed in 1969 was caused by a basalt lens in an advanced state of decomposition. The dyke was rebuilt with clay, after which a continuous wall with a total surface area of 13,000 m² and

extending down to 21 m depth was formed of grout. No further leakage has been observed in the former breach section.

● EXAMPLE 2

Tenango dyke, Mexico (Fig. 5)—Leakage flow on the right bank increasing steadily from year to year required urgent attention. A 500 m wall extending down to limited depth stopped outflows at the foot of the dyke and reduced leakage by half.

● EXAMPLE 3

Los Reyes dyke, Mexico (Fig. 6)—Leakage through this small dyke rising to a height of 8 m at the centre and 500 m in length amounted to 221/sec. A groutwall with a total surface area of 5,600 m² cut leakage down to 21/sec (fig. 7).

● EXAMPLE 4

Nexapa dyke, Mexico (Fig. 8)—The danger at this dyke did not come from the leakage rate (241/sec.), which was acceptable for its size (50 m in height), but from the sediment in the water. In order to control erosion rather than stop leakage, a 9,700 m² wall was cast in the ground, which reduced leakage to 10.71/sec. and completely stopped the sediment (Fig. 9).