

Pathologie et traitement du drainage des digues perméables de la Compagnie nationale du Rhône

Laurence Duchesne, Gilles Tratapel et Rémi Taisant

Les endiguements des retenues et des canaux d'aménage réalisés par la Compagnie nationale du Rhône, dans le cadre des aménagements à buts multiples du Rhône se développent dans les basses plaines alluviales du fleuve, dont les terrains sont constitués de matériaux limoneux déposés par les crues sur des alluvions grossières perméables. Leur grande longueur (20 à 50 km par aménagement) nécessite une conception très économique, favorisant le réemploi des matériaux trouvés sur place et des déblais utiles aux ouvrages définitifs. Les principes de leur conception et de leur fonctionnement sont de fait originaux, leurs problématiques et leurs pathologies aussi.

Caractéristiques générales des ouvrages et incidence de la conception

Principales caractéristiques des digues

Ce sont des digues de hauteur modérée composées d'un noyau en limon en place rechargé soit par des limons compactés, soit par des alluvions graveleuses.

La recharge est elle-même encadrée par une recharge amont en alluvions grossières et une recharge aval constituée des mêmes matériaux (figure 1).

L'absence de revêtement étanche impose de considérer comme intimement liés la digue et son support qui sont au contact d'écoulements d'eau importants lors de la mise en eau.

Sollicitations hydrauliques

Du fait de leur perméabilité, les digues dans leur conception doivent être résistantes aux sollicitations dues :

- à la charge hydraulique : il s'agit d'un phénomène global, par mise en charge hydraulique du talus aval de la digue ;
- à la pression de courant : il s'agit d'une réaction à l'eau en mouvement lié à la longueur de l'écoulement et à la charge hydraulique, c'est un phénomène local ayant pour effet d'entraîner les grains du sol ;
- aux sous pressions : il s'agit des pressions qu'exerce l'eau sur les limites imperméables supérieures.

Les principes de la stabilité

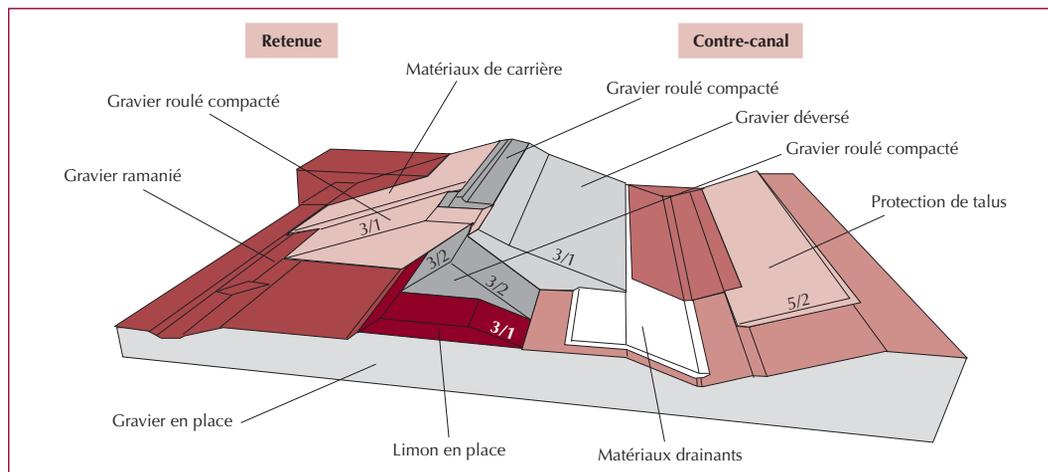
Pour neutraliser les effets hydro-dynamiques qui en résultent, il est nécessaire de :

- diminuer le gradient hydraulique par une longueur d'écoulement suffisamment grande et adoucir les pentes de talus aval ;
- favoriser un drainage intense en pied de digue pour éviter les sous-pressions et abaisser la charge hydraulique ;
- prévoir un dispositif immobilisant le transit des matériaux fins au travers du corps de digue ;
- de réduire le débit entrant par les alluvions grossières en place.

Les contacts

Compagnie nationale du Rhône,
2, rue André-Bonin,
69316 Lyon Cedex 4

► Figure 1 – Principe digue type gravier (CNR).



Les études de conception sur les digues des différents aménagements le long du Rhône et le retour d'expérience permettent aujourd'hui de valider les dispositions de conception et de mise en œuvre. En synthétisant l'ensemble des résultats, les critères de la stabilité des digues du Rhône se traduisent par :

(i) **des conditions sur la géométrie de la digue** (figure 2) qui se déclinent selon les caractéristiques suivantes : la ligne de saturation doit avoir une pente inférieure à 5/1 (H/V), Les talus en limon rapporté doivent avoir une pente inférieure à 4/1 (H/V) et les talus en gravier rapporté doivent avoir une pente inférieure à 3/1 (H/V) ;

(ii) **des conditions sur la perméabilité et la granulométrie des matériaux** mis en œuvre (figure 3) qui se déclinent selon la condition d'écran ou de filtre de Costes et Sanglerat : une perméabilité décroissante au niveau de la clé amont, une perméabilité croissante au niveau de la clé aval

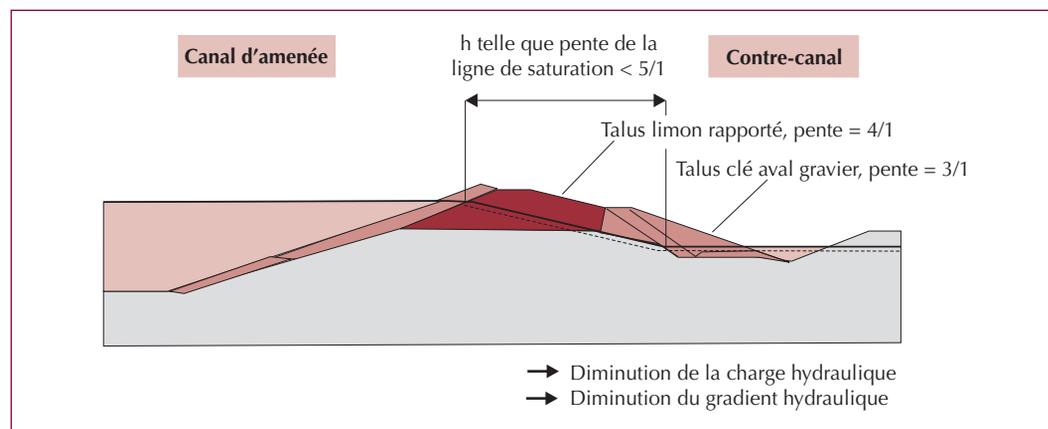
et, à un troisième principe, sur la granulométrie des matériaux, telle que les plus grosses particules entraînées par l'écoulement soient retenues par la couche de sol en aval. On complète le dispositif, en remaniant les alluvions grossières en place au contact du canal, pour réduire leur anisotropie (KH/KV de l'ordre de 100) et ainsi réduire le débit entrant ;

(iii) **des conditions sur la perméabilité et les matériaux en place** au niveau de l'interface limons-graviers.

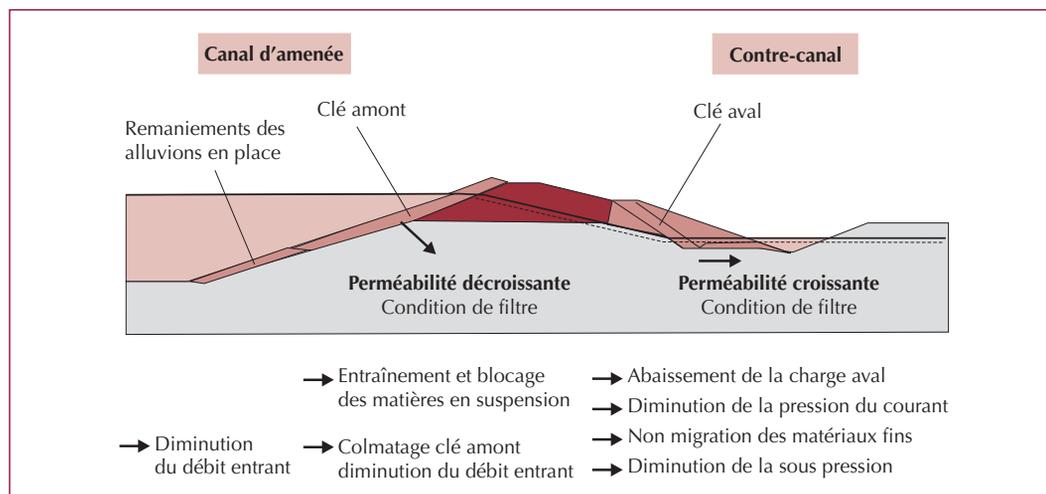
Pathologie et principe des traitements

Préambule

Terzaghi a dit « *Malheureusement les caractéristiques d'un sol ne se représentent pas, comme celle d'un béton, par deux ou trois paramètres. Le sol n'est pas homogène* ». ».



► Figure 2 – Conditions de géométrie de la digue (CNR).



◀ Figure 3
– Conditions de perméabilité et de granulométrie des matériaux (CNR).

Ce qui se traduit, sur le grand linéaire de digue de la CNR et sur des zones singulières, par des anomalies ; on parle alors d'incidents, repérés par le dispositif de surveillance mis en place au sein de la Compagnie.

Grâce à ces dispositions, il n'y a jamais eu de rupture de digue CNR à déplorer jusqu'à présent, même suite aux événements exceptionnels vécus en 1994, 2002 et 2003. L'analyse sur les incidents antérieurs a montré que les principales causes de dysfonctionnement sont liées à l'augmentation du gradient hydraulique, ce qui se traduit par l'entraînement des matériaux fins et la décompaction du corps de digue. Un exemple de ce type de pathologie est abordé en fin d'article.

Plusieurs expertises internes et pour compte de tiers faites par la Direction de l'ingénierie de la CNR permettent d'appréhender, malgré tout, l'ensemble des pathologies liées à la perméabilité (charge hydraulique, pression de courant, sous-pression) et de lister aujourd'hui différents types de traitement pour améliorer le fonctionnement des digues perméables.

Cas de pathologie liée aux sous pressions

DESCRIPTION

L'eau de nappe ou l'eau de percolation de la digue n'a pas de possibilité de communication avec le contre-canal et se met en charge sous le corps de digue. Le constat est souvent visuel, des remous apparaissent en fond de contre-canal. Lorsqu'il y a des forages de décompression, ils sont actifs, l'eau s'écoule au dessus du contre-canal. Lorsqu'il

y a des piézomètres en aval du talus de la digue et au-delà des ouvrages dans la plaine, ils détectent une augmentation de la charge hydraulique.

TYPES DE TRAITEMENT

Il s'agit alors de rétablir une communication entre l'eau en charge et le contre-canal par l'intermédiaire de puits verticaux drainants appelés aussi forages de décompression. Le résultat est validé par l'abaissement de la charge hydraulique dans les piézomètres.

Cas de pathologie liée à la charge hydraulique aval

DESCRIPTION

Le drainage de la digue ne s'avère pas assez efficace pour permettre l'évacuation des eaux de percolation de la digue, soit parce que le débit entrant est trop fort, soit parce que la perméabilité aval de la clé drainante n'est pas suffisante. Le constat peut être visuel (tâche d'humidité, suintement sur le talus aval, végétation hydrophile) et détecté par les piézomètres en aval de la digue qui indiquent une charge hydraulique.

TYPES DE TRAITEMENT

Il y a alors deux types de solutions de traitement :

- soit d'étancher le corps de digue et ainsi de réduire le débit entrant ;
- soit de drainer la partie aval de la digue pour augmenter la perméabilité de la clé aval.

Le résultat est validé par l'abaissement de la charge hydraulique dans les piézomètres.

Cas de pathologie liée au gradient hydraulique

DESCRIPTION ET TYPES DE TRAITEMENT

Une veine plus perméable dans le corps de digue permet à l'écoulement d'avoir une vitesse suffisamment rapide pour entraîner les particules les plus fines vers un point aval de résurgence. Le phénomène est au démarrage très localisé, puis par entraînement des matériaux fins, la zone devient plus perméable, et les vitesses d'écoulement plus importantes, le gradient augmente, et des matériaux de plus en plus grossiers peuvent être entraînés. Le phénomène d'érosion interne croît jusqu'à aboutir à un phénomène de « renard » ou de « fontis ». Ce phénomène est le plus souvent détecté par visualisation d'un écoulement avec dépôt de matériaux fins, ou par un affaissement localisé. Il est rarement mesuré par les piézomètres. Il y a alors deux types de solution de traitement :

- soit étancher le corps de digue et ainsi couper l'écoulement ;
- soit rétablir une couche filtre dans la partie aval de la digue pour diminuer la migration des particules fines.

Le résultat est validé par l'assèchement de la résurgence ou par une vitesse d'écoulement de la résurgence réduite et non chargée de fines.

Exemple

L'exemple choisi est lié au phénomène d'érosion interne, phénomène le plus générateur de dysfonctionnements sur les digues du Rhône. L'incident est situé en rive gauche de l'aménagement de Beauchastel au PK 118,5. Il a été constaté depuis la mise en eau de l'aménagement en 1964.

La digue étudiée présente une hauteur de 9,75 m depuis la crête jusqu'au fond du contre-canal. Elle permet d'équilibrer une charge hydraulique de 8 m entre le niveau de la retenue et le niveau du contre-canal. Elle est constituée d'une recharge en gravier rapportée sur un noyau de limon en place (figure 1).

CONSTATS

Les fuites principales sont observées du PK 118,45 au PK 118,70. Les venues d'eau secondaires plus ou moins actives sont aussi observées en fonction

du débit du Rhône, en amont et en aval de la zone. Les arrivées d'eau se font principalement en pied de digue au niveau de la clé aval près du contre-canal et peuvent percoler 20 à 50 cm au-dessus du niveau d'eau du contre-canal. Une fuite est localisée au tiers du talus aval. Les fuites entraînent des fines que l'on retrouve en atterrissements dans le contre-canal. On note la présence d'une ancienne lône coupée par la construction de l'endiguement.

DIAGNOSTIC COMPORTEMENTAL – ANALYSE

Il existe des écoulements dans les graviers rapportés et dans les graviers de fondation (en particulier au niveau de l'ancienne lône), dont le cheminement est complexe et varié. L'érosion interne est active. Il est à noter qu'aucun piézomètre ne mesure de charge hydraulique alors que les résurgences des fuites sont à un niveau supérieur par rapport aux niveaux piézométriques mesurés. Les résurgences aval se localisent principalement autour de l'ancien tracé de la lône de Rivecourt.

En appui du diagnostic, une campagne de mesures thermométriques a été réalisée, ainsi qu'une campagne par panneaux électriques. Deux types de solution de confortements peuvent être envisagées.

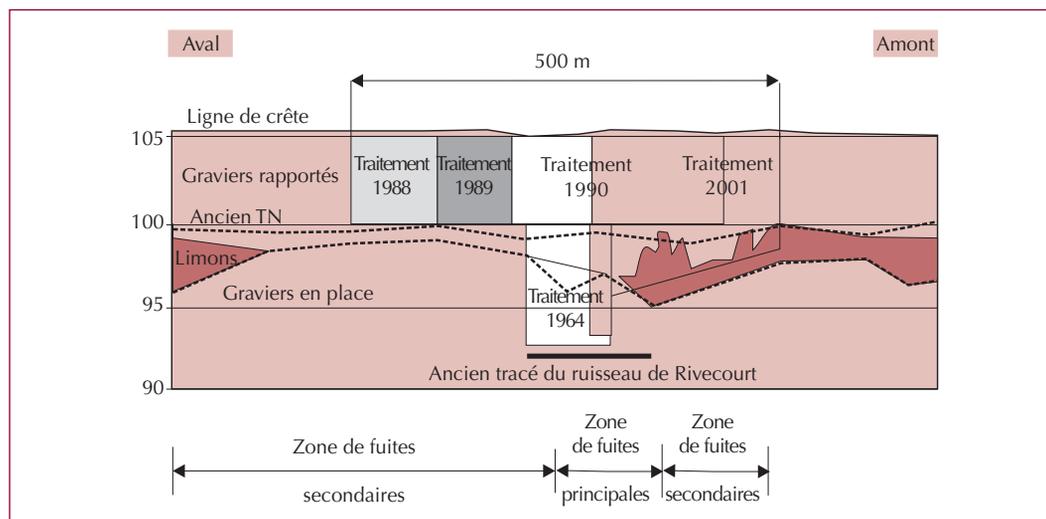
- **Solution 1 – Mise en place d'une couche filtre en recharge aval** : il s'agit de mettre en œuvre une butée de pied drainante, stabilisatrice, et faisant obstacle à la migration des matériaux fins.

- **Solution 2 – Interception des écoulements** : il s'agit soit de colmater le parement amont de la digue, par mise en place de matériaux fins clapés sur le parement, soit de mettre en œuvre une étanchéité dans le corps de digue.

CONFORTEMENTS RÉALISÉS

La figure 4 récapitule sur un profil en long les traitements successifs suivant :

- 1963 : mise en place d'une risberme en gravier de 4 m de large et drainage par un canal de surface des principales fuites ;
- 1964 : injection des graviers de fondations ;
- entre 1968 et 1984 : essai de colmatage des cratères d'aspiration amont par la mise en place de matériaux fins ;



◀ Figure 4 – Profil en long Beauchastel (CNR).

- 1988, 1889, 1990 : injection, sur une hauteur de 5 m ;
- 1998 : lors des travaux de la Roselière, clapage de matériaux sur le parement amont ;
- 2001 : réalisation d'un l'écran étanche.

RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LE CONFORTEMENT RÉALISÉ

Après avoir essayé de drainer la zone en aval des fuites, en restituant la condition de filtre de manière à limiter l'érosion interne, la solution d'étancher a été retenue.

Le traitement a été approché « pas à pas » de manière à cerner les fuites, en fixant à chaque fois des hypothèses de la localisation des écoulements.

À ce jour, il demeure une veine perméable alimentant des fuites résiduelles au pied du talus aval. La zone reste sous surveillance et un diagnostic ultime validera la nécessité de réaliser un traitement complémentaire. Cet exemple montre combien il est complexe de traiter ce type de pathologie lié à l'érosion interne et à des écoulements aléatoires. La technique du traitement « à tiroir » ou par approximation successive semble dans ce cas la mieux adaptée car on bénéficie du retour d'expérience et d'un peu plus de connaissances sur la constitution du sol.

Récapitulatif des solutions

Le tableau 1 retrace les techniques de confortements envisagées ces dix dernières années, au niveau de la création d'une étanchéité, avec des critères de technicité et de fiabilité au niveau du résultat. Le tableau 2 retrace les techniques de confortements envisagées ces dix dernières années, au niveau de la création d'un drainage, avec des critères de technicité et de fiabilité au niveau du résultat.

Conclusion

Cet exposé présente un aperçu général des méthodes de conceptions et des méthodes de traitement des pathologies des digues de la CNR. L'absence d'incidents majeurs survenus sur ces ouvrages depuis leur réalisation montre que la conception d'origine était particulièrement bien adaptée par rapport aux sollicitations. La pathologie principale à laquelle les digues seront confrontées dans l'avenir est liée à leur vieillissement et au mécanisme d'érosion interne. L'expérience a montré que c'est un phénomène complexe qui exige un diagnostic détaillé sur la base d'éléments de reconnaissances de sols complémentaires (sondages géotechniques, reconnaissance géophysique, inspection visuelle), et que, même dans ces conditions, l'approche du traitement définitif doit se faire pas à pas. □

		Technique	Avantages	Inconvénients
CRITÈRE ÉCONOMIQUE	CRITÈRE TECHNIQUE	Injection « classique » <i>Fiabilité 85 %</i>	Machine de forages de faible gabarit. Imprégnation et recompaction du terrain sur une hauteur bien définie. Facilité de mise en œuvre. Auto-régulation et moyens de contrôle par enregistrements (P, V).	Difficultés pour évaluer les volumes injectés au stade PRO. Ne permet pas d'injecter des matériaux trop fins. Risque de colmatage des drains en place. Nécessité d'une couverture de sol suffisante pour pouvoir monter en pression.
		Paroi épaisse à la bentonite à la pelle rétro <i>Fiabilité 95 %</i>	Machine de gabarit moyen. Quantités maîtrisées. Épaisseur importante permettant une bonne reprise des charges hydrauliques.	Installation d'une centrale d'injection. Délicat lors de la phase de la réalisation de l'excavation. Risque d'abaissement du coulis dans la tranchée. Problème de l'évacuation des déblais (mélange terrain-bentonite). La pelle ne traverse pas les enrochements.
		Paroi mince <i>Fiabilité 80 %</i>	Rapidité de mise en œuvre. Pas de déblais.	Le profilé ne traverse pas les enrochements et les couches de gros galets. Risque de perte de colis et risque de discontinuité. Compactage possible de la digue et risque de tassement. Risque de percement de la paroi due à la charge hydraulique amont. Machine de gabarit important.
		Paroi en palplanches <i>Fiabilité 85 %</i>	Facilité de mise en œuvre. Pas de déblais.	Ne traverse pas les enrochements et les couches de gros galets. Machine de gabarit important. Recépage nécessaire de la tête pour permettre de rétablir la circulation sur la piste.
		Clapage amont <i>Fiabilité 10 à 20 %</i>	Facilité de mise en œuvre. Pas de déblais.	Trouver les matériaux dont la granulométrie permet le colmatage. Solution souvent provisoire, ne marche pas sur un long terme.

▲ Tableau 1 – Comparaison des techniques d'étanchéité.

	Technique	Avantages	Inconvénients
CRITÈRE ÉCONOMIQUE ↑ CRITÈRE TECHNIQUE ↑	Tranchée drainante (longitudinale ou transversale) <i>Fiabilité 70 %</i>	Réalisation avec des techniques de terrassement.	Méthodologie complexe d'ouverture de la digue en charge. Drainage superficiel.
	Forage de décompression <i>Fiabilité 70 %</i>	Machine de faible gabarit. Efficacité immédiate.	Intervention dans le contre-canal. Difficulté à dimensionner le nombre nécessaire. Risque de colmatage à moyen terme.
	Forage drainant <i>Fiabilité 70 %</i>	Machine de faible gabarit. Facilité de mise en œuvre.	Difficulté d'intercepter un écoulement très localisé. Difficulté à dimensionner le nombre nécessaire. Risque de colmatage à moyen terme. Risque de contournement hydraulique de l'écoulement.

▲ Tableau 2 – Comparaison des techniques de drainage.

Résumé

Les endiguements le long du Rhône sont soumis à des sollicitations hydrauliques permanentes. Leur conception, originale par le fait qu'ils sont perméables, a été affinée au fil de la réalisation des aménagements de 1939 à 1987. Leur surveillance régulière permet de détecter les anomalies de fonctionnement liées à une augmentation de leur charge hydraulique ou du gradient hydraulique, ou dues aux sous-pressions. Chaque pathologie observée fait l'objet d'un constat, d'un diagnostic, et d'un confortement si nécessaire. Une synthèse basée sur l'ensemble du suivi et de la maintenance, au cours de ces dix dernières années, permet de qualifier l'ensemble des techniques pour améliorer le fonctionnement des ouvrages.

Abstract

The embankments up along the Rhone are undergoing permanent hydraulic effects. Their design, original by the fact that they are permeable, has been constantly adapted to the development of the Rhône river schemes from 1939 to 1987. Their regular monitoring allows to detect any operating disorders related to an increase of the hydraulic discharge or gradient, or due to the uplifts. Each disorder detected is the object of a report, a diagnosis, and if necessary, a reinforcement. Three different cases are detailed up to the experience feed back of reinforcement. A synthesis based on the whole monitoring and maintenance over the last ten years allows to appreciate the whole techniques in order to perform the works operation.