

Projet de confortement de la levée du Val d'Authion

Marc Leclercq ^a, Arnaud de Bonviller ^b et Luc Deroo ^c

Le projet de confortement de la levée du Val d'Authion s'inscrit dans le plan inter-régional « Loire Grandeur Nature » lancé en 1994. Ce programme a pour ambition de coordonner les différentes politiques publiques concernant l'eau sur le bassin de la Loire. Il s'articule autour de trois axes :

- la sécurité des populations face au risque d'inondation ;
- la satisfaction des besoins quantitatifs et qualitatifs ;
- la restauration de la diversité écologique du milieu.

Le Plan Loire inscrit les programmes de confortement et d'entretien des levées à l'intérieur d'une approche intégrée combinant protection contre les crues, prévention et prévision.

Le projet de confortement de la levée du Val d'Authion a été déclaré d'utilité publique le 31 août 2000. Lors du contrat État-Région 1994-1999, les premières études ont conduit à assurer les travaux les plus urgents. Il s'agissait de réaliser des butées en enrochement en pied de levée partout où celui-ci était directement en contact avec le lit mineur. Ces travaux seront poursuivis au cours du contrat État-Région 2000-2006. Cependant, celui-ci sera principalement consacré à la définition des solutions techniques et à la réalisation des travaux de confortement du talus aval.

Le présent article expose les résultats de ces études. Il insiste en particulier sur trois aspects :

- dans la phase de diagnostic, l'approche retenue pour caractériser le risque de rupture sur l'ensemble du linéaire ;
- le choix des solutions techniques de confortement ;
- le dimensionnement des écrans étanches.

Si dans l'analyse du risque, le mécanisme de rupture par glissement du talus amont a été abordé, la présente communication ne s'intéresse qu'aux solutions techniques relatives au mécanisme de rupture par glissement du talus aval et par érosion interne. En effet, si on excepte le risque d'érosion en crue du lit de la Loire en pied de levée qui est traité par les travaux en cours de création d'une butée de pied en enrochement, le risque de glissement du talus amont apparaît faible et surtout limité au cas d'une décrue brutale. Dans ces conditions, les conséquences d'un tel événement sont moins importantes car il n'y a plus de risque d'invasion du val par les eaux de la Loire.

Descriptif de la levée du Val d'Authion

La levée de protection du Val d'Authion contre les crues de la Loire s'étend sur 48 km entre la limite départementale de Maine-et-Loire et d'Indre-et-Loire à l'amont et la limite communale de la Daguenière et des Ponts-de-Cé à l'aval.

Les contacts

a. Service Maritime et de Navigation de Nantes,

2, rue Marcel-Sembat,
44049 Nantes Cedex 4

b. ISL,
1, avenue du Bois
l'Abbé, 49070
Beaucouzé Cedex

c. ISL,
75, bd Mac Donald,
75019 Paris

La hauteur de levée est variable et comprise entre 3 et 7 m tandis que la pente de talus aval varie entre 1,2 H/V et 2 H/V. La largeur en crête est comprise entre 9 et 12 m.

Les pentes de talus peuvent être qualifiées de fortes et relativement indépendantes de la hauteur de digue. Les éléments sur l'évolution du profil en travers de la levée depuis le XVI^e siècle (Dion, 1961) font apparaître une surélévation successive de la levée sans modification des pentes de talus (on assisterait plutôt à un raidissement des pentes de talus entre 1573 et nos jours).

Limons et sables constituent les matériaux de la levée et de la fondation. Une grande hétérogénéité est mise en évidence par les sondages géotechniques réalisés. Cette hétérogénéité est à relier à l'histoire de la levée :

- à l'origine, son tracé reliait les montilles naturelles, buttes de sables formées à l'intérieur du lit de la Loire ;
- le tracé recoupe d'anciens chenaux de la Loire ;
- les matériaux de remblais utilisés pour sa construction ont varié. Les sondages ont mis en évidence un « noyau » primitif limoneux, entouré et surmonté de recharges plus sableuses.

Une dernière particularité géotechnique joue un rôle important dans le comportement de l'ouvrage : les sables et limons de fondation sont fréquemment surmontés d'une couche de « jalle », argile limoneuse peu perméable.

Le substratum se situe à une profondeur comprise entre 10 et 16 m.

Un habitat important s'est développé à l'abri de la levée du Val d'Authion. Quatre types de situations sont rencontrés :

- le bâtiment construit sur la levée, entre route et Loire (le plus souvent à l'abri du muret) ;
- le bâtiment construit sur la levée, de l'autre côté de la route (côté val) ;
- le bâtiment construit sur le talus côté val, et empiétant sur celui-ci ;
- le bâtiment construit au pied de la levée, ou à faible distance.

L'État a décidé d'engager un projet de confortement de la levée dimensionné pour un niveau de la Loire correspondant à une crue de 7 000 m³/s

au bec d'Allier de période de retour estimée à 200 ans.

La cote de la crue de référence est sensiblement identique à celle de la crue de 1856. Le niveau de la crue de référence atteint en général la crête de la levée, restant en dessous de la base du muret, excepté dans la partie extrême aval.

Analyse préalable du risque de rupture de la levée du Val d'Authion

Méthodologie d'analyse (figure 1)

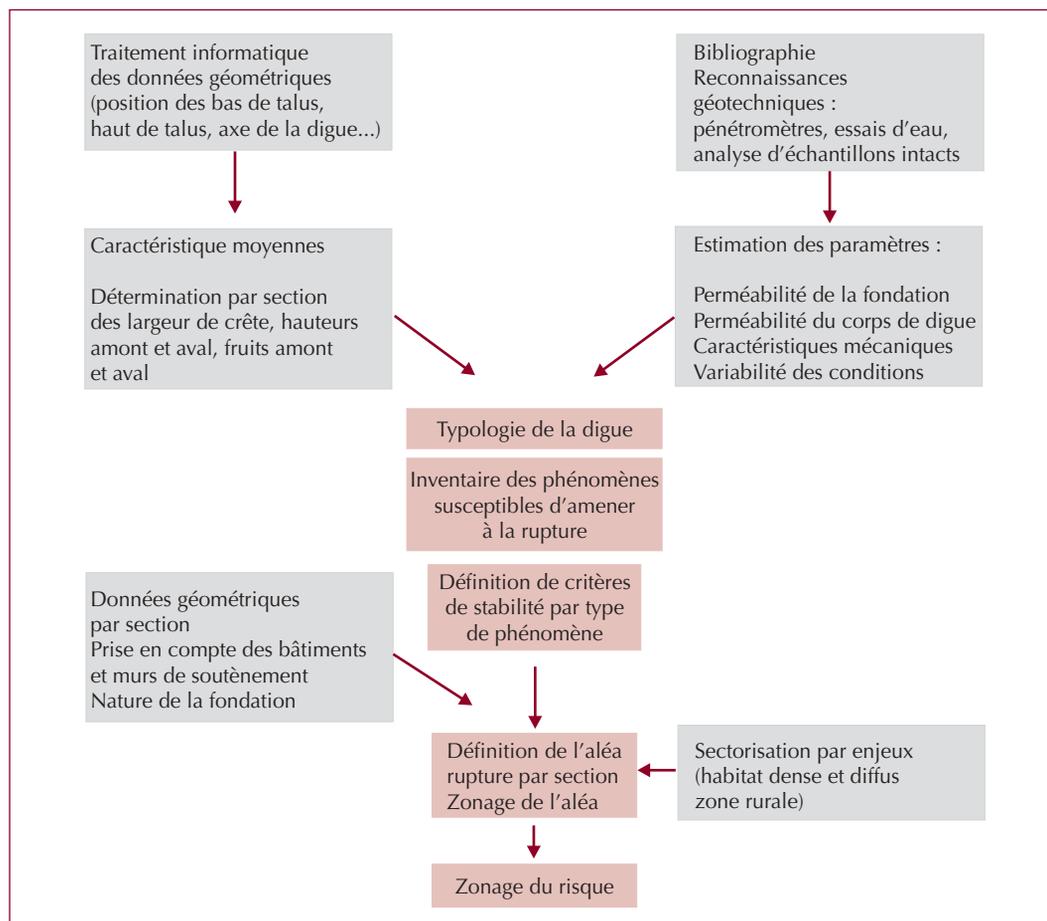
La méthode s'inspire des démarches générales d'estimation du risque :

- estimation de l'aléa rupture par croisement des paramètres représentatifs des différents mécanismes de rupture ;
- estimation des enjeux situés derrière la levée (vulnérabilité) ;
- estimation du risque par croisement de l'aléa et de la vulnérabilité.

Le terme aléa est ici utilisé par analogie et ne caractérise pas à proprement parler la probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel.

L'aléa rupture a été estimé de la manière suivante :

- mise en évidence d'une typologie des situations rencontrées basée sur les caractéristiques géométriques de la levée et la structure de l'ouvrage et de sa fondation ;
- inventaire des mécanismes pouvant engendrer la rupture ;
- définition de critères de stabilité vis-à-vis des mécanismes de rupture identifiés ;
- mise en évidence de relations empiriques caractérisant la stabilité pour chaque mécanisme de rupture et chaque type de levée identifié préalablement ;
- calcul sur 920 sections des paramètres entrant en jeu dans les relations empiriques mises en évidence ; pour chacune des sections, affectation d'une note pour chacun des mécanismes de rupture ;
- caractérisation de l'aléa pour chacune des sections par somme pondérée des notes attribuées pour chacun des mécanismes de rupture ;



◀ Figure 1
– Analyse du risque
rupture – Approche
méthodologique

- identification de tronçons homogènes vis-à-vis de l'aléa rupture ;
- identification de zones de vulnérabilité homogène derrière la levée ;
- estimation du risque par croisement de l'aléa et de la vulnérabilité.

Synthèse de l'analyse des risques

Les critères de sécurité retenus pour l'analyse générale de la rupture sont les suivants :

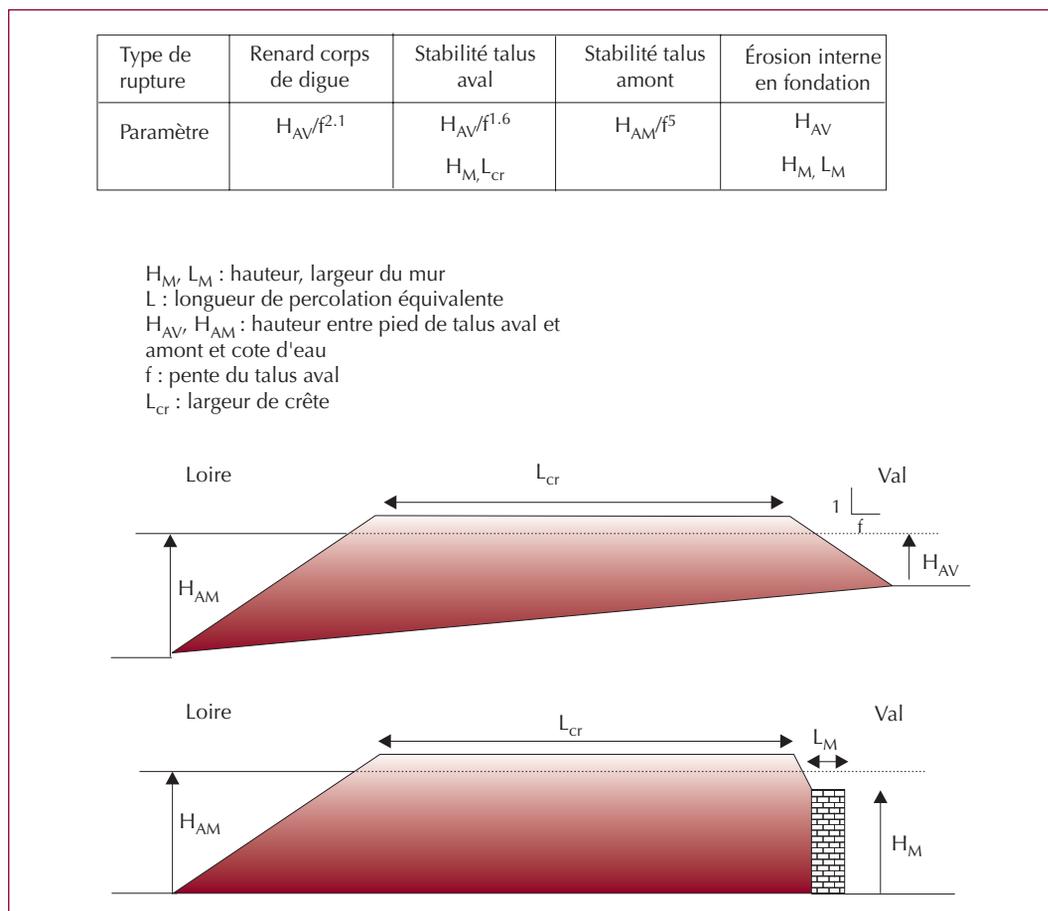
- stabilité des talus (amont, aval) : coefficient de sécurité 1,5 vis-à-vis du glissement, ramené à 1,3 en crue ;
- stabilité du muret de crête : coefficient de sécurité 1,5 vis-à-vis du glissement et du basculement, ramené à 1,3 en crue ;
- érosion interne, boulangère : gradient admissible 0,5 (ce qui correspond à un coefficient de sécurité théorique de 2 vis-à-vis du gradient critique).

La stabilité à l'érosion interne est la plus difficile à apprécier. Il existe en effet des règlements et des usages de la profession bien établis pour la stabilité au glissement. Ce n'est pas le cas pour l'érosion. Hormis dans quelques cas spécifiques (écoulement sous les ouvrages en béton, règle de Lane), stabilité des fonds de fouille des enceintes batardées), la pratique est généralement d'adapter la conception des ouvrages pour empêcher le développement du phénomène. Cette stratégie habituelle ne peut pas toujours s'appliquer aux ouvrages existants.

Notre parti a été de calculer des gradients théoriques à l'aide de logiciels aux éléments finis (régimes transitoire et permanent) et d'adopter un coefficient de sécurité relativement confortable. Le coefficient de sécurité 2 est retenu, qui est justifié de deux manières :

- le gradient critique théorique, qui génère des phénomènes d'érosion interne, est environ égal à 1. Expérimentalement, l'initiation du phénomène de

► Figure 2 – Les paramètres pris en compte dans la construction des abaques.



mise en flottaison des particules de sable fin (début de boulangue) intervient pour un gradient de 0,65. Un coefficient de sécurité 2 vis-à-vis du gradient critique théorique correspond à un gradient de 0,50, et donc coefficient de sécurité 1,3 ($= 0,65/0,50$) ;

– les ouvrages neufs sont usuellement dimensionnés avec des coefficients de sécurité supérieurs. Le *Design guidance on levee (Technical Letter N° 1110-2-555)* recommande un coefficient de 2,8 (par rapport au gradient critique 1). Des coefficients égaux à 3 sont courants. Il est admis de retenir des coefficients inférieurs pour des ouvrages anciens, qui ont globalement fait la preuve de leur stabilité.

À chaque mécanisme de rupture, a été attaché un poids, fonction de la dangerosité.

On identifie ainsi :

– la rupture par renard (poids = 4) : rupture soudaine au plus fort de la crue, avec envahissement du val ; pas d'intervention possible ;

– rupture du talus aval (poids = 2) : rupture soudaine au plus fort de la crue, avec envahissement du val possible si la rupture du talus est importante ; pas d'intervention possible ;

– rupture côté Loire à la décrue (poids = 1) : rupture soudaine après la crue ; pas d'envahissement du val.

Les caractéristiques géométriques de la levée varient rapidement le long de la zone considérée. Pour remédier à l'impossibilité de mener à bien des calculs de stabilité pour toutes les géométries rencontrées, des abaques ont été construits à partir de calculs de stabilité des talus et de l'estimation des gradients de sortie. Les paramètres pris en compte dans ces abaques sont décrits dans la figure 2. Cette analyse a permis de juger globalement de la nécessité de réalisation des confortements, de mettre en évidence les secteurs les plus dangereux et ceux pour lesquels aucune intervention n'est nécessaire et d'identifier les mécanismes de rupture en jeu par tronçons.

Choix des solutions de confortement du talus aval

Stratégies envisagées et critères de choix

Les processus de rupture sont liés aux contextes suivants :

- un matériau de levée dans l'ensemble peu perméable mais probablement hétérogène et affecté de désordres locaux peu visibles ;
- une pente de talus aval forte ;
- une fondation hétérogène avec des passées sableuses ;
- au droit des zones bâties, des murs de soutènement dans un état médiocre.

Trois stratégies d'intervention ont été envisagées :

- chercher à couper les écoulements dans la digue et la fondation ;
- chercher à éviter le départ des matériaux subissant les forces tractrices de l'écoulement ;
- drainer le pied de talus et réaliser un dispositif filtrant.

Dans le contexte de la levée du Val d'Authion, on retiendra les points suivants :

- la stratégie de type 1 est efficace : on agit sur la cause de la rupture, à savoir les écoulements à travers la levée et la fondation et on corrige partiellement les hétérogénéités dans la levée ; la profondeur du substratum constitue cependant une contrainte technique ;
- la stratégie de type 2 est efficace : on traite les conséquences (migration des matériaux vers l'aval) ;
- la stratégie de type 3 est d'un point de vue général peu adaptée compte tenu de l'hétérogénéité du corps de digue et de la fondation. Drainer accroît les gradients dans la levée, ce qui peut conduire à des désordres dans le corps de la levée.

Six solutions techniques sont comparées :

- recharge aval : le talus côté val est rechargé pour atteindre une pente 2,5 H/1V, un tapis filtrant et drainant en matériaux granulaires est mis en place ;
- écran étanche dans le corps de la levée ;

- membrane sur le parement amont et paroi étanche en fondation fichée en pied de talus ;
- clouage du talus et drainage en pied aval ;
- substitution des matériaux existants par des matériaux aux propriétés physiques et hydrauliques adaptées ;
- soutènement du talus par mur et recharge.

Parmi les solutions envisagées :

- la paroi étanche et la membrane sur talus amont peuvent être envisagées pour (presque) toutes les configurations d'occupation des sols ;
- le clouage et la substitution s'accommodent de la présence de bâtiment à proximité du pied de la digue ; une petite augmentation d'emprise (2 m environ) est requise ;
- la recharge aval demande une augmentation d'emprise d'une dizaine de mètres au moins.

Les critères de choix pris en compte ont été les suivants :

- l'efficacité de la solution vis-à-vis des 4 mécanismes de rupture mis en évidence,
- la pérennité ;
- la facilité de mise en œuvre, liée principalement à l'emprise nécessaire à la réalisation ;
- le coût.

L'analyse a été réalisée selon 2 grandes zones d'occupation du sol derrière la levée : la zone rurale, sans contraintes d'emprise, la zone bâtie pour laquelle le critère « mise en œuvre » prend de l'importance.

En zone rurale, la solution recharge aval est la solution la plus intéressante. La solution paroi étanche est classée en seconde position ; elle compense son coût plus élevé par des avantages en terme d'efficacité et de pérennité. La solution clouage sera réservée à des zones pour lesquelles le seul mécanisme de rupture identifié est le glissement du talus aval.

En zone bâtie, la solution recharge aval est disqualifiée par rapport à la paroi : en effet, les conditions de mise en œuvre autour de bâtiments inscrits dans la levée ou au pied de la levée sont souvent rédhibitoires. Les deux solutions qui apparaissent les plus intéressantes sont la paroi étanche et la membrane. Cette dernière solution n'a pas été retenue car plus chère que la solu-

tion « paroi étanche ». En effet il y a nécessité de démonter le perré pour mettre en place la membrane étanche, de le reconstituer ensuite et de réaliser un écran étanche au niveau de la fondation.

De cette analyse, on tire les principes suivants :

- en zone rurale, la recharge aval est préconisée ;
- en zone bâtie dense, la solution écran étanche est retenue ; le choix s'est porté sur la technique de la palplanche enfoncée par vérinage pour des raisons de grande vulnérabilité du bâti existant aux vibrations ;
- en zone bâtie peu dense et diffuse, les solutions sont analysées au cas par cas en fonction du contexte technique (classe d'aléa), du contexte socio-économique (localisation du bâti par rapport au pied de talus, valeur économique du secteur) ; les solutions de clouage, de substitution et de soutènement sont alors envisagées.

En zone bâtie peu dense, les solutions de confortement ont été guidées par des règles communes afin d'assurer une égalité de traitement.

Dimensionnement des palplanches – Localisation et profondeur de l'écran étanche

Position du problème

La solution par écran étanche assure le confortement de la levée en :

- abaissant la ligne piézométrique dans la digue ; les conditions de stabilité du talus côté val sont donc améliorées ;
- limitant les gradients de sortie en pied de digue ;
- assurant un rôle de soutènement ultime de la levée en cas de rupture du talus côté val.

En pratique, le rideau permet de recouper les hétérogénéités du corps de digue et de la fondation. Il empêche les circulations préférentielles au sein de lentilles sableuses en fondation ou de zones peu compactes de la digue.

Au stade préliminaire des études, les justifications du choix de la technique de confortement par palplanche vérinée reposaient sur deux avantages :

- cette solution est mise en œuvre sans emprise coté val ; elle s'adapte donc bien aux cas de figures rencontrés sur environ 1/3 du linéaire étudié : bâtis sur, dans, ou à proximité du pied de talus ;
- elle limite les nuisances liées aux vibrations dans des lieux très sensibles (bâti à moins de 10 m de la zone de fonçage).

Au stade projet, il a été nécessaire de répondre à trois interrogations principales :

- quelle est la profondeur de fiche adaptée en fonction des conditions géométriques et géotechniques locales ?
- quelle est la localisation optimale du rideau ?
- quels sont le type, module, étanchéité de la palplanche constituant le rideau.

Les contraintes sont les suivantes :

- un substratum situé à plus de 10 m de profondeur, ce qui écarte les possibilités de son recoupement par le rideau, pour des raisons économiques (nécessité de palplanches de longueur supérieure à 15 m) ;
- une fondation localement hétérogène avec en particulier des couches minces argileuses surmontant des matériaux sablo-graveleux (couche de Jalle).

La valeur de la cohésion des matériaux a été précisée en se référant à la situation la plus critique connue. On a considéré pour les digues les plus hautes (6,5 m), l'épisode de crue de 1982 pendant lequel aucun désordre ne s'est produit. Le niveau d'eau de 1982 est inférieur de 1 m par rapport à celui de la crue de référence.

Critères de stabilité retenus

ÉROSION INTERNE

Les critères de stabilité ont été affinés pour le dimensionnement du renforcement. Les critères suivants ont été retenus :

- fondation sableuse : les gradients de sortie restent inférieurs ou égaux à 0,5 ;
- fondation limoneuse : les gradients de sortie restent inférieurs ou égaux à 0,65.

On admet un critère un peu plus souple pour les limons, pour tenir compte de leur plus grande résistance à l'érosion interne (rôle de la cohésion).

GLISSEMENT DU TALUS AVAL

Dans le cas de la levée du Val d'Authion, le coefficient 1,30 n'est pas obtenu avec la solution de confortement proposée pour les digues de grande hauteur, et ce quelle que soit la profondeur de la fiche dès lors que le rideau ne recoupe pas le substratum imperméable. Des coefficients de sécurité plus faibles de 1,20 pour des fondations sableuses et de 1,25 pour des digues supérieures à 5 m et de fondation limoneuse ont été admis. Pour ces valeurs, on vérifie que l'écran en palplanche assure une fonction de soutènement de la digue en cas de rupture de la digue sur sa partie aval, prévenant ainsi la rupture de la levée (sécurité ultime). Pour cette raison, la position de l'écran côté Loire a été privilégiée.

Notons que dans tous les cas, la mise en œuvre des palplanches ramène la ligne de saturation calculée pour la crue de projet en dessous de celle calculée pour la crue de 1982 sans palplanches.

CAS PARTICULIER D'UNE FONDATION HÉTÉROGÈNE

La charge hydraulique sous la couche argileuse est renseignée par la modélisation des écoulements avec SEEP. La modélisation ne prend pas en compte le rideau de palplanches car celui-ci n'influe que très légèrement sur la charge sous la couche argileuse.

L'ensemble des simulations permet de proposer un critère de sécurité fonction de H_{av} , différence entre cote d'eau et cote de pied de talus, et de E, épaisseur de la couche de jalle : $H_{av} \leq 1,6 E$. Elle n'est pas assurée si la couche est moins épaisse. Dans ce cas, on recourt à des puits de décompression pour assurer la stabilité de la couche de Jalle.

Analyse croisée des paramètres – Hauteur des fiches

La fiche est définie à partir de plusieurs critères :

- prise en compte des hétérogénéités ;
- gradient en sortie ;
- stabilité au glissement du talus aval ;
- soutènement.

Le tableau 1 présente les fiches retenues en fonction de la nature de la fondation (limoneuse ou hétérogène) et de la charge amont ; la fiche correspond à la longueur de palplanche à partir de la cote de terrain naturel.

FONDATION LIMONEUSE

Pour une charge amont faible, les critères de sécurité vis-à-vis des gradients et du glissement sont respectés. Toutefois, il convient de traiter le corps de digue et l'interface digue-fondation compte tenu des hétérogénéités non prises en compte par le calcul. Pour des charges un peu plus élevées, le critère dimensionnant devient le gradient en sortie.

FONDATION SABLEUSE ET HÉTÉROGÈNE

Pour des charges amont faibles (≤ 5 m), c'est la prise en compte des hétérogénéités qui dimensionne la fiche.

Pour des charges plus importantes, ce sont les calculs en fondation entièrement sableuse qui sont dimensionnants. Les hétérogénéités ne sont plus prédominantes car situées en profondeur, elles n'influent plus sur les critères de stabilité de la levée.

Critère	Fondation						
	Limoneuse			Hétérogène			
Charge hydraulique	4 m	5 m	5,5 m	4 m	5 m	5,5 m	6,5 m
Hétérogénéité	2	2	2	6	7	8	8
Gradient	–	3	5	2	4	5	9
Stabilité	–	2	3	4	5	8	10
Soutènement	–	1,5	1	2,5	1,5	1	0
Valeur retenue	2	3	5	6	7	8	10

◀ Tableau 1 – Critères de définition des fiches.

N.B. : la charge maximale reconnue sur les tronçons en fondation limoneuse est 5,5 m.

Conclusion

La diversité des conditions rencontrées sur les levées de l'Authion a conduit à explorer différentes solutions techniques de confortement. Une analyse préliminaire a consisté à qualifier le risque de rupture par croisement de l'aléa rupture et des enjeux derrière la levée. La détermination de l'aléa rupture a amené à définir des paramètres caractéristiques de la stabilité générale de la levée. Elle a permis de distinguer les portions de digues à conforter de celles réputées stables dans l'état actuel.

Parmi les solutions techniques explorées, la solution de confortement par recharge aval est efficace. Elle ne peut être mise en œuvre qu'en zone rurale.

La solution de l'écran étanche constitue la solution de base pour le confortement des levées du Val d'Authion dans les secteurs pour lesquels aucune emprise côté val n'est possible. L'analyse détaillée des écoulements et de la stabilité pour différentes conditions géométriques et géotechniques a montré que le problème était complexe. La diversité des conditions rencontrées a demandé de procéder à des calculs détaillés :

- un calage sur l'événement de 1982 afin de préciser la valeur de cohésion à considérer dans les calculs ;

- pour les talus de hauteur supérieure à 6 m, une simulation de cas de rupture du talus aval et le fonctionnement du rideau en soutènement comme sécurité ultime ;

- la prise en compte des hétérogénéités de fondation dans le calcul des gradients de sortie et l'analyse des conditions de débouillage de la couche de limons supérieure.

Le confortement par rideau de palplanches améliore la stabilité de la levée vis-à-vis des filtrations. Il fournit également une sécurité intrinsèque supplémentaire : en cas de défaut de stabilité, la rupture soudaine de la digue ouvrant une brèche (comportement « fragile ») n'est plus possible, le défaut de stabilité se manifestant plutôt par des désordres graves sans brèche avec une certaine réserve de stabilité avant rupture totale.

L'analyse a mis en évidence la difficulté de définir des critères de sécurité vis-à-vis de l'érosion interne.

Le programme de confortement de la levée du Val d'Authion en est aujourd'hui au stade des travaux. La première étape concerne la mise en œuvre du rideau de palplanches. Suivront les opérations relatives à la mise en œuvre de la recharge aval et au traitement des cas particuliers, étape qui exige au préalable que la procédure liée à l'expropriation des terrains concernés soit achevée. □

Résumé

Le projet de confortement de la levée du Val d'Authion a été déclaré d'utilité publique le 31 août 2000. Cette opération a été inscrite au volet plan Loire du contrat État-Région 2000-2006. Le présent article expose les résultats des études de diagnostic et de définition des solutions techniques. Il insiste en particulier sur trois aspects : l'approche retenue pour caractériser le risque de rupture sur l'ensemble du linéaire, le choix des solutions techniques de confortement et le dimensionnement des écrans étanches. Selon le type d'occupation rencontré sur la levée et en contre-bas du talus côté val d'une part et les particularités géotechniques d'autre part, des techniques différentes de confortement sont préconisées. La solution de l'écran étanche constitue la solution de base pour le confortement des levées du Val d'Authion dans les secteurs pour lesquels aucune emprise côté val n'est possible. L'analyse détaillée des écoulements et de la stabilité pour différentes conditions géométriques et géotechniques a montré que le dimensionnement de l'écran était un problème complexe. L'analyse a mis en particulier en évidence la difficulté de définir des critères de sécurité vis-à-vis de l'érosion interne pour des ouvrages anciens.

Abstract

Strengthening the levee of Val d'Authion was declared as a "public interest project" on 31 August 2000. The 2000-2006 contract between the State and the regional authorities is devoted to the definition of the technical solutions and the construction of the strengthening works. The article comments the results of the studies and particularly insists on three aspects : the evaluation of the failure risk, the choice of the technical solutions and the design and dimensions of the watertight barrier. According to the land properties constraints and the geotechnical features along the levee, different technical solutions are recommended. The watertight barrier solution is well adapted to the urban context. The detailed flow and seepage analysis and the stability computations for different configurations showed that dimensioning the barrier characteristics is a complex task. The analysis shows the difficulty for defining the safety criteria against piping in the case of old levees.