

Projet de confortement de la levée du Val d'Authion

Reinforcement Project of the levee of the « Val d'Authion »

Marc LECLERCQ

Service Maritime et de Navigation de Nantes
2 rue Marcel Sembat 44049 Nantes cedex 04
Tel. 02 40 71 02 00
Fax 02 40 71 02 19
E.mail : marc.leclercq@equipement.gouv.fr

Arnaud de BONVILLER

ISL
1 avenue du Bois l'Abbé,49070 Beaucozuté cedex
Tel. 02 41 36 01 77
Fax 02 41 36 10 55
E.mail : arnaud.debonviller@isl-ingenierie.fr

Luc DEROO

ISL
75 bd Mac Donald 75019 Paris
Tel. 01 55 26 99 99
Fax 01 40 34 63 36
E. mail : luc.deroo@isl-ingenierie.fr

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 Etat-Région 2000-2006. Le présent article expose les résultats des ~~ees~~ 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.

Mots-clés : levée, digue, risque, confortement, rupture, érosion interne

Keywords : levee, embankments, reinforcement, failure, internal erosion

1 Le contexte

Le projet de confortement de la levée du Val d'Authion s'inscrit dans le plan interrégional « 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 Etat-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 Etat-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, les travaux de confortement du talus amont ont été définis en 1999 et les travaux sont en cours.

2 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 à l'amont et des Ponts-de-Cé à l'aval.

La hauteur de levée est variable et comprise entre 3 et 7 mètres tandis que la pente de talus aval varie entre 1.2H/V et 2H/V. La largeur en crête est comprise entre 9 et 12 mètres.

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 XVIème 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).

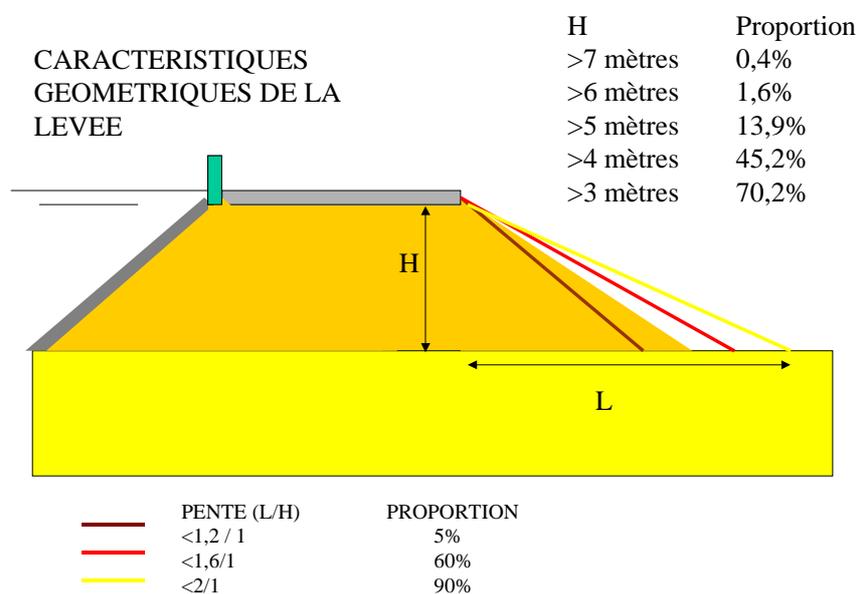


Figure 1 : caractéristiques géométriques de la levée du Val d'Authion

Les derniers travaux réalisés sur la levée datant du début des années 1970 ont eu pour objectif d'amener la crête de levée au niveau de la cote de 1856 et le sommet du muret, 1.10 mètre au-dessus cette même cote.

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 :

- A 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.

Le rapport de 1899 faisait le constat suivant : « en principe, le noyau du remblai intérieur est beaucoup trop étroit pour former un écran imperméable ; en fait sillonné en tous sens par des galeries d'animaux souterrains, raviné par les eaux pluviales, il est loin d'être plein et compact et constitue un véritable crible au travers duquel les crues filtreraient avec abondance en provoquant des éboulements d'autant plus redoutables qu'ils sont susceptibles, comme en 1856, de se généraliser et qu'on pense se trouver alors dans l'impossibilité d'aviser à temps aux moyens d'opposer aux eaux des barrières improvisées ».

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 mètres.

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.

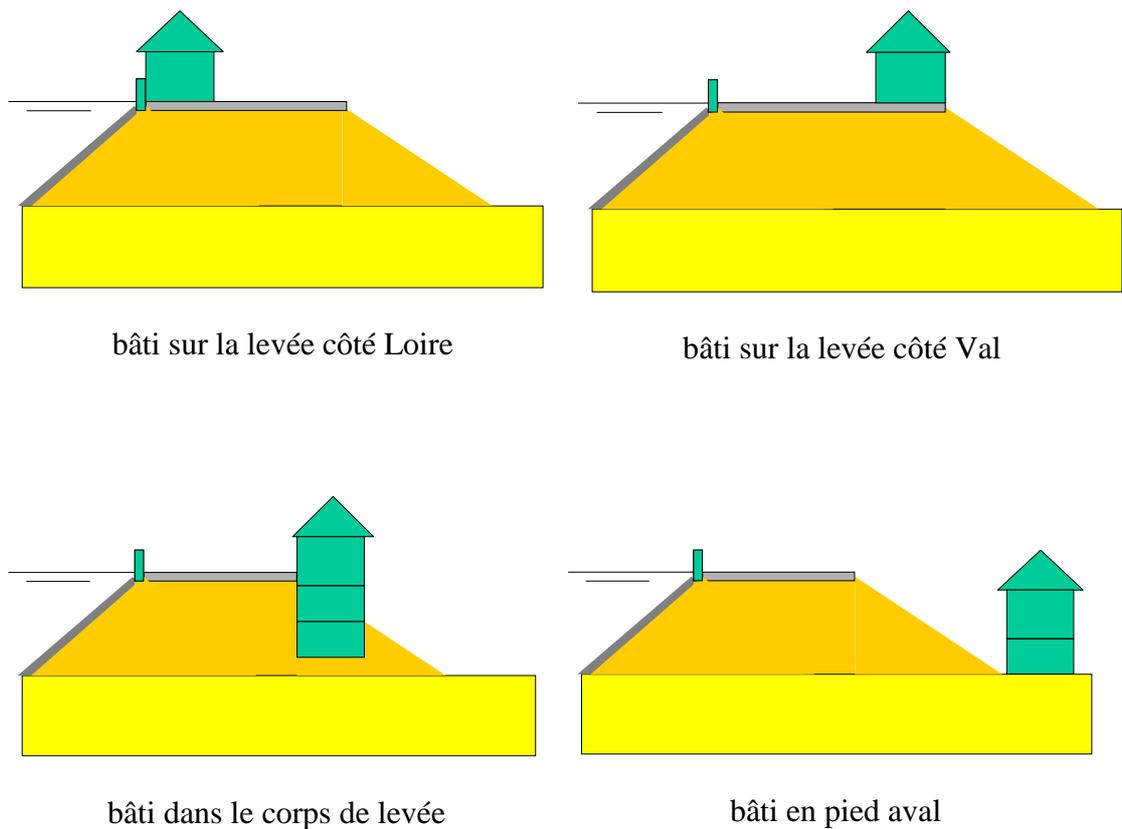


Figure 2 : positions du bâti vis-à-vis de la levée du Val d'Authion

L'Etat a décidé d'engager un projet de confortement de la levée dimensionné pour un niveau de la Loire correspondant à une crue de 7000 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 la cote de la crue de 1856 hormis dans la partie aval où elle est supérieure et la partie en amont de Saumur où elle est inférieure. 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.

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

3.1 Méthodologie d'analyse

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

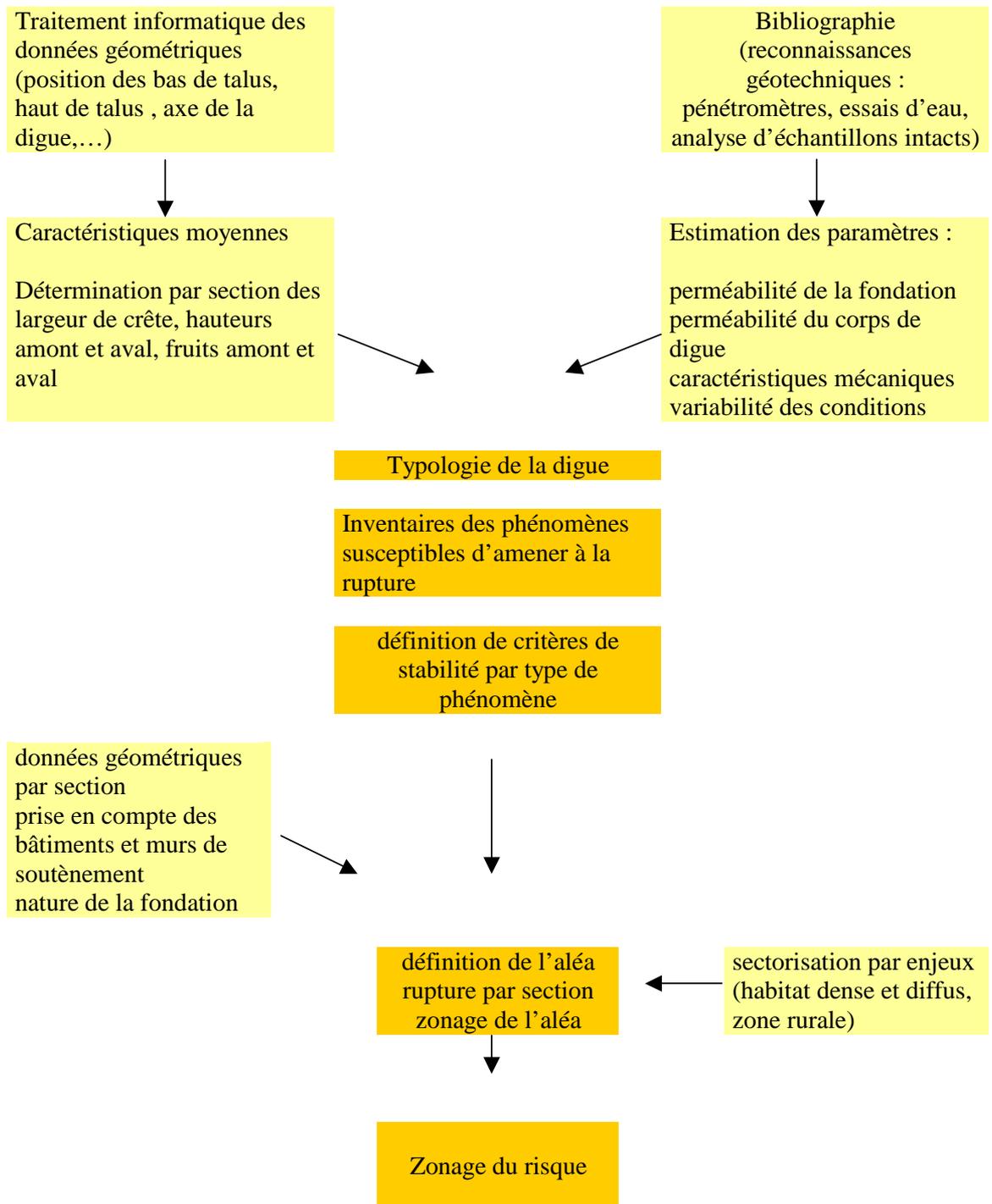
- estimation de l'aléa rupture par croisement des paramètres représentatifs des différents mécanismes de rupture,
- estimation des enjeux situés derrière la levée (vulnérabilité),
- estimation du risque par croisement de l'aléa et de la vulnérabilité.

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,
- 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.

Analyse du risque rupture – approche méthodologique



3.2 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, boulangerie : 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 mise en flottaison des particules de sable fin (début de boulangerie) 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 No. 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.

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

La dangerosité est liée à deux critères :

- un critère de soudaineté : les phénomènes les plus dangereux sont ceux qui ne préviennent pas,
- un critère d'ampleur des conséquences : la rupture peut être complète (envahissement du val) ou au contraire se limiter à des désordres importants sans rupture complète (la fonction de protection contre les crues est préservée).

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. Ces abaques font intervenir les paramètres suivants :

type de rupture	Renard corps de digue	stabilité talus aval	stabilité talus amont	érosion interne en fondation
paramètre	$H_{AV}/f^{2.1}$ L	$H_{AV}/f^{1.6}$ H_M, L_{cr}	H_{AM}/f^5	H_{AV} H_M, L_M

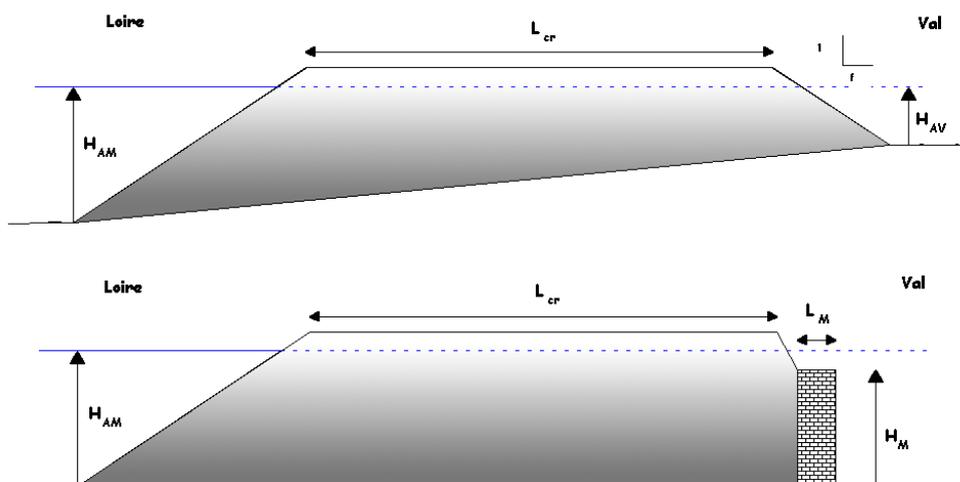
H_M, L_M : hauteur, largeur du mur

L : longueur de percolation équivalente

H_{AV}, H_{AM} : hauteur entre pied de talus aval et amont et cote d'eau

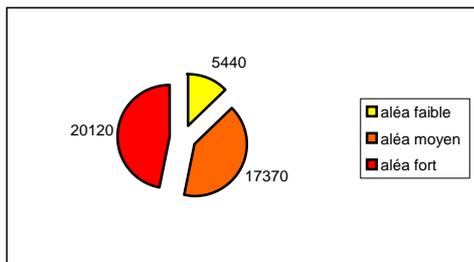
f : pente du talus aval

L_{cr} : largeur de crête

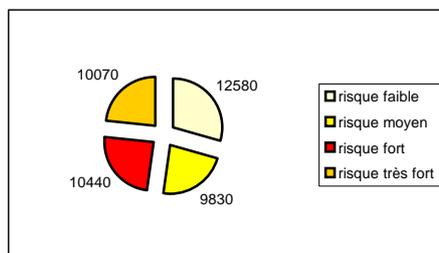


Le tableau ci-après présente de façon synthétique et simplifiée l'ensemble des paramètres qui définit l'aléa rupture de digue.

Les graphes ci-après présentent les proportions pour chaque classe d'aléa et de risque. La classification résulte d'un calcul automatique des paramètres pour chaque profil en travers (920 profils), du calcul de l'aléa par addition des notes obtenues pour chaque type de rupture analysé, d'un report sous SIG de tronçons homogènes du point de vue de l'aléa rupture puis du croisement sous SIG avec les classes de vulnérabilité des terrains côté val (estimation du risque).



linéaire de levée concerné par classe d'aléa

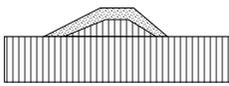
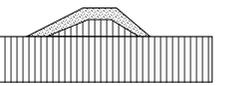
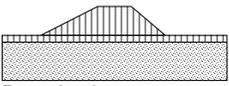
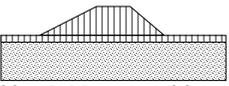
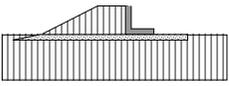
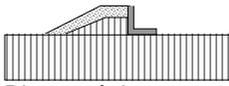
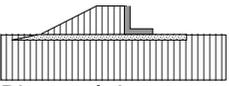


linéaire de levée concerné par classe de risque

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.

Cependant, le maître d'ouvrage a considéré à la suite de cette analyse que l'aléa de rupture du talus amont avec envahissement du Val devait être traité quel que soit le niveau de risque. En effet au-delà du danger pour les vies humaines qui bien entendu est le souci prioritaire, les conséquences économiques et psychologiques d'une inondation du Val même sans dégâts directs aux habitations (brèche en rase campagne) resteraient trop importantes en raison même de l'occupation de ce val.

A l'opposé en ce qui concerne le talus amont le maître d'ouvrage a considéré qu'il n'y avait pas lieu de traiter la rupture à la décrue du fait du non envahissement du Val et de la possibilité de procéder à des réparations. Seules des butées de pieds ont été réalisées lorsqu'il y a un risque d'érosion du lit devant la levée pendant la phase de montée de la crue susceptible d'entraîner sa rupture.

Mode de rupture	Renard corps de digue poids : 4	Instabilité talus aval poids : 2	Instabilité talus amont poids : 1	Écoulement sous digue poids : 4
Type de digue				
Section courante, fondation limoneuse	 Risque réel $H_{AV}/f^{2.1} < 0,9$: stable $H_{AV}/f^{2.1} < 2,05$: prob. stable	 Risque réel $H_{AV}/f^{1.6} < 1,8$: stable	 Risque réel : $H_{AM}/f^5 < 0.18$	Pas de risque
Section courante, fondation sableuse	 Pas de risque			 $H < 3,30$ m : stable $H < 4,50$ m : probablement stable
Mur de soutènement, fondation limoneuse		 Risque réel $L_{cr} > 6 + H_M^{1.625}/1,45$: rupture locale $L_{cr} < 6 + H_M^{1.625}/1,45$: rupture globale possible Dans tous les cas : rupture locale possible		 Risque réel Mur : $H_M/H > 1,7$: stable $H_M/H > 1$: prob. stable Bâtiment : $(H_M+L_M/3)/H > 2$: stable $(H_M+L_M/3)/H > 1.2$: prob. stable
Ouvrage traversant	 Risque réel : $L/H > 15$: stable $L/H > 9$: prob. stable	analogue au cas sans ouvrage traversant	analogue au cas sans ouvrage traversant	analogue au cas sans ouvrage traversant

L : longueur de percolation équivalente (Lane)

H : charge amont

4 Choix des solutions de confortement du talus aval

4.1 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 :

1. chercher à couper les écoulements dans la digue et la fondation,
2. chercher à éviter le départ des matériaux subissant les forces tractrices de l'écoulement,
3. 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 2,5H/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,

Cependant cette solution n'a pas été retenue d'emblée car plus chère que les solutions qui suivent. 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.

- 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 oeuvre, 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 oeuvre » 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 oeuvre 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.

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 ; on a défini la notion

d'espace de vie : espace situé devant la maison d'habitation utilisé pour l'agrément et le garage des véhicules (cour intérieure).

- lorsque l'espace de vie est localisé à une distance inférieure à 25 mètres du pied de talus, des solutions alternatives à la recharge aval sont préconisées : murs de soutènement, clouage et drainage ou paroi étanche,
- les accès à l'espace de vie (qui empruntent le talus) sont déportés
- la végétation arborée est tolérée à 3,50 mètres à partir du pied de talus et une végétation buissonnante est acceptée sur le talus au devant des espaces de vie,
- si le bâti est inscrit dans le talus, le rachat ou le confortement (paroi, mur cloué) est privilégié.

5 Dimensionnement des palplanches - localisation et profondeur de l'écran étanche

5.1 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 mètres 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 ?,
- Quel est le type, le module, l'étanchéité de la palplanche constituant le rideau.

Les contraintes sont les suivantes :

- Un substratum situé à plus de 10 mètres de profondeur, ce qui écarte les possibilités de son recouplement par le rideau, pour des raisons économiques (nécessité de palplanches de longueur supérieure à 15 mètres),
- 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 mètres), l'épisode de crue de 1982 pendant lequel aucun désordre ne s'est produit. Le niveau d'eau de 1982 est inférieur de 1m par rapport à celui de la crue de référence.

5.2 Critères de stabilité retenus

5.2.1 Erosion 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).

5.2.2 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, 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 5m 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.

Nota : dans tous les cas, la mise en oeuvre 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.

5.2.3 Cas particulier d'une fondation hétérogène

Solution en écran étanche : Condition d'équilibre de la couche argileuse

La condition d'équilibre sous la couche argileuse s'écrit : $E = \frac{\gamma_w H}{\gamma_{sat} CS}$, avec :

- γ_{sat} , poids volumique saturé du sol, 18 kN/m³,
- γ_w , poids volumique saturé du sol, 9,81 kN/m³,
- H, charge hydraulique sous la couche argileuse,
- E, épaisseur de la couche argileuse,
- CS, coefficient de sécurité de 1,3.

En fonction de l'épaisseur de la couche argileuse repérée dans les sondages, la charge acceptable sous la couche est définie par $H \leq 1,4 E$.

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 : $H_{av} \leq 1,6 E$.

Par exemple, pour une différence de charge de 4 mètres entre le pied de talus aval et la crue de référence, un coefficient de sécurité de 1.3 est assuré pour :

- une couche de jalle supérieure à 2,50 m,
- une fondation limoneuse dans lequel une hétérogénéité sableuse et continue est positionnée en-dessous de 2,50 m (hypothèse de couche horizontale).

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.

5.3 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.

Est différenciée la fiche retenue en fonction de la nature de la fondation (limoneuse ou hétérogène) et en fonction de la charge amont (la fiche correspond à la longueur de palplanche à partir de la cote de terrain naturel)

Fondation	Limoneuse			Hétérogène				
	Charge hydraulique	4 m	5 m	5,5 m	4 m	5 m	5,5 m	6,5 m
Critère								
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	

nb : La charge maximale reconnue sur les tronçons en fondation limoneuse est 5,5 mètres.

Fondation limoneuse :

Pour une charge amont faible, les critères de sécurité vis-à-vis des gradients et du glissement sont respectés. Le risque de rupture est faible. 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.

6 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 mètres, 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 mise 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. L'appel d'offre concernant la mise en œuvre du rideau de palplanches a été lancé. 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.