

E0008+

81/LB/EW/SD
République Française
Ministère de l'Urbanisme
et du Logement

M. 1142/1

C.E.T.E.
NORMANDIE-CENTRE

LABORATOIRE REGIONAL DES
PONTS-et-CHAUSSEES DE BLOIS

ooo

Département du LOIR-et-CHER

VILLE DE BLOIS

ETUDE DU RENFORCEMENT DES DIGUES
DE BLOIS-VIENNE

ooo

NOTE TECHNIQUE

o
o o
o

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
I - OBJET DE L'ETUDE	2
II - DESCRIPTION DES CAS DE DIGUES CONSIDEREES	2
III - INVENTAIRE DES CAUSES POSSIBLES DE RUPTURE DE DIGUES	3 à 5
IV - RAPPEL DES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES RETENUES .	5 et 6
V - STABILITE ACTUELLE DES DIGUES CONSIDEREES	7 à 11
VI - CONCEPTION DU RENFORCEMENT DES DIGUES	11 à 16
VII - DEFINITION DE LA CONDITION DE NON-SUBMERSION DES DIGUES	16 à 19
VIII - DEFINITION DU DRAINAGE DES DIGUES	20 à 37
IX - DEFINITION DE L'ETANCHEMENT DES DIGUES.....	38 à 46
X - CONCLUSIONS	47 à 49
Références bibliographiques consultées pour cette étude	50

I -- OBJET DE L'ETUDE :

Dans le cadre du renforcement des digues de la Loire et à la demande de la Direction Départementale de l'Equipement du LOIR-et-CHER, le Laboratoire Régional des Ponts-et-Chaussées de BLOIS a effectué une approche géomécanique des différentes causes d'instabilité des digues ainsi qu'une recherche de méthodes confortatives envisageables et leur validité, pour les digues de BLOIS-VIENNE situées au Sud-Ouest de l'Avenue WILSON.

La présente note aborde les points suivants :

- description des cas de digues considérées,
- inventaire des causes possibles de rupture de digues,
- rappel des caractéristiques géotechniques retenues,
- stabilité actuelle des digues considérées,
- conception du renforcement des digues,
- définition de la condition de non-submersion des digues,
- définition du drainage des digues,
- définition de l'étanchement des digues,
- conclusions.

II - DESCRIPTION DES CAS DE DIGUES CONSIDEREES :

Le Bureau d'Etudes de l'Equipement a choisi cinq profils d'étude et les a positionnés comme suit (voir plan de situation pièce A) :

- Levée des Acacias :

- . Profil d'Etude PE.1 près du profil géotechnique n°3
- . Profil d'Etude PE.2 et PE.3 qui se situent respectivement à 200 m et 100m de part et d'autre de l'intersection de la Levée des Acacias et de la Rocade.

.../...

- Levée de Chailles :

. Profil d'Etude PE.4 qui se situe à 500 m à l'Est du profil géotechnique n° 5.

- Levée du CD. 751 :

. Profil d'Etude PE.5 situé à 530m au Sud-Ouest du profil géotechnique n°1.

Les principales caractéristiques de ces 5 profils d'étude sont résumées dans le tableau I - page 4 .

III - INVENTAIRE DES CAUSES POSSIBLES DE RUPTURE DE DIGUES :

Nous nous proposons de dresser l'inventaire des principales causes possibles de rupture de digues en distinguant d'une part le corps de la digue et d'autre part le sol de fondation.

III.1- Causes concernant le corps de la digue :

Parmi les causes les plus fréquentes on peut noter :

- a) le déversement de l'eau par dessus la digue qui par érosion des matériaux du talus aval conduit à une brèche.
- b) l'apparition de résurgences dans le talus Aval, en fin de saturation de la digue lors d'une crue, qui permettent le développement de glissements localisés ou de conditions de renard avec une érosion régressive du matériau constituant la digue.
- c) le développement de glissement sur les talus amont lors d'une vidange rapide.
- d) l'érosion du talus amont par des courants, de par leur vitesse et leur direction.
- e) l'évolution des caractéristiques des sols due au pourrissement des racines et souches de végétaux ou à l'existence de galeries creusées par des animaux fouisseurs, qui favorise les infiltrations, puis le lessivage ou l'érosion régressive des sols avec apparition de renards.

.../...

N° Profils	PE. 1	PE. 2	PE. 3	PE. 4	PE. 5
Cote plate-forme (NGF)	72,6 m	72,2 m	72,0 m	70,5 m	72,5 m (1)
Cote PHEC (NGF)	73,0 m	72,7 m	72,5 m	71,5 m	71,8 m
Largeur plate-forme	4,3 m	4,3 m	2,8 m	1,6 m	14,5 m
TALUS	4,5 m	6,0 m	6,4 m	4,7 m	6,0 m
AMONT	0,50	0,60	0,61	0,66	0,60
TALUS	3,5 m	4,5 m	2,9 m	3,0 m	3,5 m
AVAL	0,45	0,49	0,58	0,62	0,42
Remarques	-	-	-	-	(1) banquette en crête, talus amont de 0,8 m, soit 73,3 m

TABLEAU I - Principales caractéristiques des digues au droit des cinq profils d'étude

III.2- Causes concernant le sol de fondation :

Parmi les causes pouvant conduire à une rupture, on peut relever :

- l'apparition de résurgences en pied du talus aval avec formation de renards et développement d'une érosion régressive, due à des gradients hydrauliques excessifs ou à la présence de fosses au pied du talus aval.

- le développement d'affouillements au pied du talus amont qui conduit à l'apparition des glissements successifs dans le talus.

IV - RAPPEL DES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES RETENUES :

Les caractéristiques géotechniques moyennes retenues pour les différents tronçons de levées sont résumées dans le tableau II - page 6. Si l'on considère les cinq profils d'étude envisagés, on peut leur attribuer les caractéristiques suivantes :

Profils PE.1 et PE.2

Nous retiendrons les caractéristiques moyennes de la Levée des Acacias.

Profil PE.3

Nous lui attribuerons les caractéristiques moyennes de la Levée de Bas-Rivière.

Profil PE.4

Nous lui affecterons les caractéristiques moyennes de la Levée de Chailles.

Profil PE.5

Nous lui donnerons les caractéristiques moyennes de la Levée du CD. 751.

.../...

	LEVEE DU CD. 751	LEVEE DU CD. 951	LEVEE DES ACACIAS	LEVEE DE BAS-RIVIERE	LEVEE DE CHAILLIS
COTE NGF PLATE-FORME	72,3 m	73,5 m	72,7 m	71,3 m	70,7 m
LARGEUR PLATI-FORME	≥ 17 m	17m (minimum)	4 m	3 m	2,2 m
EPAISSEUR	5,0 m	6,0 m	4,5 m	3,5 m	3,5 m
NATURE	Sable limoneux, argileux ou graveleux	Sable limoneux, argileux ou graveleux	Sable limoneux, argileux	Sable limoneux, argileux	Sable limoneux argileux
PERMEABILITE	km \approx 0,5.10 ⁻⁵ m/s				
	km \approx 0,5.10 ⁻⁴ m/s				
EPAISSUR	3,5 m	3,5 m	2,5 m	3,5 m	3,5 m
NATURE	-sable limoneux ou argileux (2,0m) -sable graveleux-caillouteux (1,0m) -sable caillouteux (0,5m)	-sable limoneux ou argileux (0,5m) -sable graveleux (1,5m) -sable caillouteux (1,5m)	-sable limo-argileux (1,5m) -sable graveleux (1,0m)	-sable limoneux ou argileux (2,0m) -sable graveleux (1,5m)	-sable limoneux, ou argileux (1,5m) -sable graveleux (1,5m) -sable caillouteux (0,5m)
PERMEABILITE	(1) sable limo-argileux (2) sable graveleux (3) sable caillouteux	$k_h (1) = 0,3 \cdot 10^{-4}$ m/s $k_h (2) = 0,3 \cdot 10^{-3}$ m/s $k_h (3) = 0,3 \cdot 10^{-2}$ m/s			
NATURE	- argile à silex - craie à silex	calcaire tendre	- argile éocène - argile à silex - craie à silex	craie à silex	craie à silex
PERMEABILITE	(4) calcaire tendre (argile éocène) (5) argile à silex (6) craie à silex	$k_h (4) \approx 0,3 \cdot 10^{-4}$ m/s $k_h (5) \approx 0,3 \cdot 10^{-5}$ m/s $k_h (6) \approx 0,5 \cdot 10^{-4}$ m/s			

TABLEAU II - CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES MOYENNES RETENUES

V - STABILITE ACTUELLE DES DIGUES CONSIDEREES :

Toute digue est le siège de circulations d'eau. Aussi sa stabilité est fonction des conditions hydrauliques qui les régissent.

De ce fait, il faut distinguer 3 cas :

- la saturation de la digue pendant la montée des eaux,
- l'écoulement à travers la digue pendant une crue prolongée,
- l'écoulement lors d'une décrue rapide.

a) Saturation de la digue pendant la montée des eaux :

A la demande de la D.D.E. du LOIRET, le Bureau NEDECO a abordé ce problème dans son rapport : "Considérations théoriques concernant la stabilité des digues de la Loire lors de niveaux d'eau exceptionnellement élevés" - Delft Juin 1965.

Dans ce rapport, on peut lire que la saturation se produit d'une part, par le talus Amont et d'autre part, par le sol de fondation lorsque ce dernier est plus perméable que la digue.

Ainsi pour une digue de perméabilité 10^{-4} m/s, la saturation peut être atteinte pratiquement pendant la montée des eaux.

b) Ecoulement à travers la digue pendant une crue prolongée :

Lorsqu'une digue est soumise à une crue prolongée, elle est le siège d'un écoulement qui est fonction de la perméabilité et de la géométrie de la digue et de la perméabilité du sol de fondation.

Alors s'établit une ligne supérieure de saturation du corps de la digue qui, dans le plan de l'écoulement, marque la séparation entre la partie soumise aux infiltrations et celle restée sèche.

La détermination de la ligne de saturation est très importante, car elle constitue une condition limite précieuse pour la construction d'un réseau d'écoulement et l'estimation des débits de fuite, et permet aussi de situer le point d'émergence sur le talus Aval dont la position conditionne le dimensionnement du massif drainant dans la solution de renforcement du talus Aval par un masque drainant.

c) Ecoulement lors d'une décrue rapide :

Bien que les décrues rapides soient rares pour la Loire, cette condition de stabilité ne concerne que le talus Amont et dans ce cas elle ne met pas en péril la digue toute entière. Toutefois, cette condition affecte particulièrement la stabilité des revêtements étanches du talus amont.

On peut donc dès à présent définir les points de stabilité à vérifier pour une digue :

- protection contre le déversement,
- résurgences des écoulements sur le talus aval,
- stabilité au glissement du talus aval,
- gradient hydraulique au pied du talus aval,
- affouillabilité du talus amont et érosion,
- stabilité au glissement du talus amont.

Nous nous proposons donc d'examiner chacun de ces points pour les 5 profils de digue à étudier.

V.1- Protection contre le déversement :

Les possibilités de ruine par déversement sont fonction de la cote maximale de la digue et de celle des plus hautes eaux connues. Nous résumons ces conditions ci-dessous :

PROFILS	PE.1	PE.2	PE. 3	PE.4	PE.5
Cote NGF maximale de la digue	72,6 m	72,2 m	72,0 m	70,5 m	73,3 m
Cote NGF des PHEC	73,0 m	72,7 m	72,5 m	71,5 m	71,8 m
Déversement	oui	oui	oui	oui	non
Revanche	-	-	-	-	1,5m

Pour se préserver du déversement des eaux, il faut donc réhausser ces digues. En considérant une revanche de 1,2m et une banquette amont de 0,8m, on peut établir les conditions suivantes de réhausse :

PROFILS	PE. 1	PE. 2	PE. 3	PE. 4
Hauteur maximale de submersion	0,4 m	0,5 m	0,5 m	1,0 m
Revanche préconisée	1,2 m	1,2 m	1,2 m	1,2 m
Banquette amont préconisée	0,8 m	0,8 m	0,8 m	0,8 m
Réhausse plate-forme préconisée	0,8 m	0,9 m	0,9 m	1,4 m

La banquette amont préconisée devrait être réalisée avec un matériau peu perméable (10^{-6} m/s) et stable, donc un sable très limoneux ou limo-argileux. Sa largeur en crête serait au moins de 0,8 m. Une protection de surface est souhaitable pour faciliter l'entretien.

V.2- Résurgences des écoulements sur le talus Aval :

Dans l'état actuel, la géométrie des digues est incompatible avec les PHEC considérées, nous supposons donc que ces dernières satisfont à la condition de non-déversement. Dans pareil cas, pour une digue homogène, sans filtre aval et reposant sur un sol de fondation imperméable, nous devons considérer que le point d'émergence est fonction du niveau des eaux à l'aval de la digue, c'est-à-dire dans BLOIS-VIENNE. En première approximation, si l'on considère un niveau des eaux dans BLOIS-VIENNE à 69 m NGF, le point d'émergence sur le talus aval se situe selon les profils entre 1,0 et 2,0 m au-dessus du pied du talus, ce qui conduit à une instabilité hydraulique des talus actuels.

V.3- Stabilité au glissement du talus Aval :

Lorsque les talus présentent une pente comprise entre 0,5 et 0,6 et qu'ils ne sont pas soumis à un écoulement, leur coefficient de sécurité par rapport à un glissement est de l'ordre de 1,5.

Par contre, lorsque ces talus sont soumis à un écoulement présentant un angle de l'ordre de 15° par rapport à l'horizontale, le coefficient de sécurité se réduit à 1,1 ce qui signifie que la stabilité devient précaire.

.../...

V.4- Gradient hydraulique au pied du talus aval :

D'une manière générale, nous avons observé que la partie supérieure des alluvions présentait une perméabilité de 10 à 100 fois plus faible que celle de la partie inférieure des alluvions. Aussi, pour une telle configuration, au droit du pied du talus aval, la partie inférieure des alluvions présente une charge hydraulique résiduelle. Il faut donc qu'il y ait équilibre entre le poids déjaugé de la couche supérieure des alluvions et la sous-pression dans la couche inférieure des alluvions, multipliée par un coefficient de sécurité de 2 à 2,5. Ceci implique, que la charge hydraulique résiduelle dans les sables gravo-caillouteux ne puisse pas dépasser 0,25 m dans les endroits où la couverture peu perméable atteint 0,5 m d'épaisseur. Ce qui est peu probable.

V.5- Affouillabilité du talus Amont et érosion :

Pour la Loire, le talus amont de la levée du CD. 751 étant pratiquement rectiligne, son érosion et l'affouillement des alluvions en pied ne serait qu'un problème localisé conditionné par une évolution du fond du fleuve. Ce qui impose donc une bonne connaissance de l'allure du fond de fleuve et son suivi après chaque période de crue.

butées!

Par contre, pour la Levée des Acacias, de Bas-Rivière et de Chailles le problème est différent. En effet, ces trois tronçons de digues présentent des variations angulaires brutales. Aussi, il serait nécessaire de connaître les éléments suivants:

- orientation du courant le long de ces digues afin de protéger les talus soumis à des courants incidents,
- vitesse de courant à proximité des digues afin d'apprécier les risques d'affouillement surtout au niveau des fosses existantes le long de certaines digues.

V.6- Stabilité au glissement du talus Amont :

Pour ce talus, à condition que sa pente soit comprise entre 0,5 et 0,6, sa stabilité est assurée aussi bien dans le cas d'un talus sec que dans le cas d'un talus immergé soumis à une circulation d'eau vers l'intérieur de la digue. Le coefficient de sécurité se situant au minimum entre 1,3 et 1,5.

Par contre, dans le cas d'une vidange rapide, le coefficient de sécurité devient voisin de 1.

V.7 - *Conclusions* :

Dans l'état actuel, les digues situées au Sud de BLOIS-VIENNE ne peuvent pas supporter une crue de longue durée. En effet, même si les conditions de déversement n'étaient pas atteintes, la stabilité des talus Aval risque d'être compromise :

- par apparition de points d'émergence et de renards,
- par dépassement du gradient critique en pied du talus Aval dans la couche supérieure des alluvions,
- par développement de glissement dans le talus.

Ces causes d'instabilité sont fonction de la présence localisée très probable de matériaux présentant des caractéristiques inférieures aux caractéristiques moyennes retenues.

VI - CONCEPTION DU RENFORCEMENT DES DIGUES :

Deux principes généraux de renforcement sont envisageables :

a) *Principe de drainage* :

Ce renforcement tient compte de la perméabilité plus ou moins importante des digues et de leur sol de fondation et a pour objet d'empêcher la formation de résurgences et de renards dans le talus Aval ou au pied de ce dernier. On réalise ainsi un système drainant Aval qui répond à des conditions imposées.

b) *Principe d'étanchement* :

Ce renforcement a pour objet :

- soit de réduire la perméabilité de la digue et des sols perméables sous-jacents par un écran vertical de faible perméabilité,
- soit d'imperméabiliser le talus Amont pour limiter les infiltrations et de réduire la perméabilité des sols perméables sous-jacents par un écran vertical peu perméable.

.../...

Ces deux types de renforcement ont leurs avantages et leurs inconvénients. Ainsi le renforcement Aval avec un système drainant doit être largement dimensionné pour pallier aux hétérogénéités et aux colmatages. Quant à l'étanchéité, il est fonction de la qualité de son exécution et de la pérennité des produits utilisés.

Cependant en dehors de ces deux principes de renforcement, il ne faut pas perdre de vue le principal élément de la stabilité qui est le non-déversement de l'eau sur le talus aval. Aussi faut-il rechercher à situer la crête de la digue bien au-dessus de la cote des plus hautes connues. Nous préconisons une revanche de 1,2 m.

VI.1 - Conception du renforcement par drainage :

Le renforcement d'une digue par drainage a deux objectifs :

- 1) - rabattre la ligne de saturation ou surface libre dans le talus aval afin d'éviter des points d'émergence dans le talus et supprimer les forces d'écoulement et la poussée d'Archimède qui réduisent la résistance au cisaillement donc la stabilité Aval.
- 2) intercepter les résurgences Aval des circulations d'eau dans le sol de fondation et charger la zone concernée, pour assurer la stabilité des sols soumis à des gradients élevés.

La conception classique d'un tel renforcement de stabilité comprend deux dispositions :

- 1) recours à un masque drainant stable au glissement qui va rabattre la surface libre de l'écoulement dans la digue, et qui va surcharger, sur une certaine longueur, le sol de fondation situé à l'Aval immédiat de la digue pour éviter les phénomènes de renard dus à la résurgence des eaux d'infiltration sous la digue. Cependant, il faut s'assurer que dans le plan de contact, digue ancienne - masque drainant, la condition de non-contamination est satisfaite.

.../...

2) mise en oeuvre d'un tapis drainant situé à la base du masque drainant et permettant d'évacuer les eaux drainées sans aucune érosion régressive ce qui suppose que son dimensionnement soit adapté :

- au débit d'eau à évacuer,
- à la granulométrie des sols en place (non contamination du filtre),
- à la direction imposée de l'écoulement et des conditions de rejet (charge hydraulique aval résiduelle).

En outre, si le sol de fondation perméable est constitué par un bicouche et que la couche inférieure soit la plus perméable, il faudra alors compléter le tapis drainant par des puits verticaux de décharge dont le dimensionnement doit être également fonction des critères énoncés ci-dessus.

La réalisation pratique d'un tel renforcement de stabilité peut présenter de nombreuses variantes. Nous donnons ci-après trois conceptions particulières :

- a) - masque drainant, tapis drainant et puits de décharge exécutés avec des matériaux propres et calibrés.
- b) - drain subvertical entre la digue et une surcharge (stable, mais de perméabilité et de granulométrie quelconques), tapis drainant et puits de décharge exécutés avec des matériaux propres et calibrés.
- c) - drain subvertical, tapis drainant et puits de décharge réalisés avec des matériaux synthétiques, tels que les géotextiles et des canalisations crépinées en matière plastique.

VI.2- Conception du renforcement par étanchement :

Le renforcement par étanchement peut concerner le sol de fondation, le corps de la digue ou l'ensemble. Dans le cas qui nous concerne, le débit de fuite essentiel transite par le sol de fondation donc, dans le cas d'une imperméabilisation partielle, il faudrait étancher en priorité le sol de fondation.

.../...

a) Etanchement limité au sol de fondation :

La conception la plus efficace est l'implantation d'un rideau de palplanches au pied du talus amont, avec un léger ancrage de l'ordre de 0,5 m à 1,0m dans le substratum (justification à préciser en fonction des possibilités d'affouillement retenues).

REMARQUES IMPORTANTES :

On peut, pour des considérations indépendantes du renforcement proprement dit, envisager un rideau de palplanches en pied du talus aval, avec en outre une étanchéité partielle ou totale, selon le problème à résoudre. Cependant, cette conception présente de nombreux inconvénients dans le cas d'une étanchéité presque totale :

- *développement de sous-pressions importantes sous l'ensemble de la digue ce qui conduit à une alimentation des infiltrations dans la digue par sa base,*
- *apparition de gradient hydraulique important au point de fuite, d'où risque de renards ou nécessité de mettre en place à l'aval du rideau, un réseau de puits de décharge si les points de fuite sont bien connus, et dans le cas contraire, une tranchée de décharge.*

Dans le cas où l'on souhaite créer une étanchéité partielle, une étude de CASAGRANDE (1961) pour un rideau centré sous une digue, montre que l'efficacité du système est réduite très rapidement. En effet, le débit de fuite est d'autant plus faible, que les points de fuite sont plus espacés, à pourcentage d'ouverture fixe pour une longueur de digue donnée. Ainsi, pour une longueur de rideau égale à la largeur de base de la digue, soit par exemple 30 m, on devra disposer de 60 palplanches, type LS. Si l'on retient une section ouverte relative de 1 %, le pourcentage de réduction du débit de fuite se résume ainsi :

Nombre d'ouvertures sur 30 m	1	2	3	4
Surface d'ouverture en hauteur pour une palplanche	½ hauteur	1/4 hauteur	1/8 hauteur	1/16 hauteur
Espacement des ouvertures en nombre de palplanches	60	30	15	7
Pourcentage de réduction du débit de fuite	80 %	60 %	40 %	30 %

.../...

Ainsi par exemple, si l'on considère 2 ouvertures sur 30 m de rideau, on obtiendra 60 % de réduction du débit de fuite pour une ouverture au droit d'une palplanche toutes les 30 palplanches et ceci sur 1/4 de la hauteur de la couche perméable.

Ceci montre que l'on maîtrise mal des écrans partiellement étanches sachant toutefois que ceux qui sont considérés comme totalement étanches, ne le sont jamais effectivement et ceci principalement pour des raisons d'exécution et d'hétérogénéité des sols.

b) Etanchement limité à la digue :

Lorsqu'on cherche à étancher le corps d'une digue, il semble préférable de s'orienter vers un revêtement étanche du talus amont. Parmi les solutions possibles on peut retenir :

- le perré maçonné (solution déjà utilisée autrefois),
- le revêtement en dalles de béton armé avec joints au mastic bitumineux,
- le revêtement avec des membranes étanches protégées par de la terre végétale et du gazon ou par un enrochement,
- le revêtement avec une couche d'argile peu plastique engazonnée ou protégée par un enrochement. Son épaisseur devrait être de 2 à 3 m.

Pour tous ces revêtements étanches, il est impératif de mettre en place au préalable une couche drainante qui permettra d'éviter des désordres dus à des sous-pressions lors de la décrue.

c) Etanchement simultané du sol de fondation et de la digue :

Il est toujours possible de combiner l'étanchement (a) et l'étanchement (b) qui constituent alors une étanchéité du sol de fondation par un rideau situé au pied du talus Amont, complété par un revêtement étanche du talus Amont.

Cependant, l'étanchement simultané du sol de fondation et de la digue peut être envisagé à partir de la plate-forme de la digue et sa position la plus efficace le situe entre la crête amont et l'axe de la levée.

La réalisation pratique d'un tel écran d'étanchéité peut être envisagée à partir :

- d'un écran étanche au coulis de ciment-bentonite, voire ciment-argile-bentonite (paroi mince ou diaphragme continu d'une épaisseur de 7 à 10 cm ou paroi continue en coulis ou béton plastique d'une épaisseur de plus de 50 cm).

- un rideau continu en palplanches. Dans ce dernier cas, si une réhausse de digue était envisagée, celle-ci pourrait être assurée par une partie du rideau en élévation dont les éléments pourraient être peints au préalable selon les impositions locales.

VII - DEFINITION DE LA CONDITION DE NON-SUBMERSION DES DIGUES :

La submersion de digues en cas de PHEC concernent la digue des Acacias, de Bas-Rivière et de Chailles.

Plusieurs conceptions de réhausse sont envisageables :

- reprofilage géométrique de la digue avec un matériau stable et peu perméable,
- réhausse avec un rideau de palplanches qui constituerait un écran étanche jusqu'au substratum,
- réhausse avec un ouvrage en béton armé du type mur de soutènement.

VII.1- Reprofilage géométrique des digues :

Le reprofilage serait exécuté avec un matériau voisin de celui constituant les digues actuelles.

a) Ces caractéristiques recherchées seraient les suivantes :

- sable fin à moyen ou limo-argileux,
- faible plasticité $W_L < 45 \%$ - $I_p < 20 \%$
- teneur en fines : 30 à 40 %
- équivalent de sable : 20 à 30
- poids spécifique en place : $\gamma \simeq 18 \text{ KN/m}^3$
- angle de frottement interne $\phi' = 35^\circ$
- cohésion drainée $C' \simeq 10 \text{ kPa}$
- coefficient de perméabilité $k \simeq 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s.}$

.../...

b) La géométrie de la digue préconisée est la suivante : (voir fig.1-page 18)

- pente du talus amont 1/2
- pente du talus aval 1/3
- cote minimale de la plate-forme : PHEC + 0,4 m
- cote minimale de la banquette amont : plate-forme + 0,8 m
- géométrie de la banquette : pente talus amont 1/2
pente talus aval 1/1 - largeur en crête 0,8 m
- largeur totale de la plate-forme : 4 m (non compris la banquette).

Ainsi pour les digues concernées, le reprofilage nécessaire est résumé, selon les profils étudiés, dans le tableau III ci-après. Ce reprofilage géométrique implique en outre la réalisation d'un drainage dans le talus aval.

VII.2- Réhausse avec un rideau de palplanches :

Profitant de l'exécution d'un rideau d'étanchéité en palplanches, il est envisageable de lui donner une cote supérieure égale à celle des PHEC + 1,2 m.

La géométrie de la digue doit être définie de façon que le rideau de palplanches soit stable en cas de crue et que les talus aient une pente de $\frac{1}{2}$.

VII.3- Réhausse avec un ouvrage de soutènement :

Mettre hors d'eau la plate-forme de la digue à l'aide d'un ouvrage en béton armé du type soutènement est une solution délicate pour les raisons suivantes :

- nécessité d'élargir les plates-formes des digues afin de pouvoir fonder le mur de façon que les bords des semelles soient situés à environ 4m de la crête des talus,
- profondeur de fondation : $\geq 0,8$ m
- taux de travail admissible $q_a \simeq 1$ bar
- l'estimation des tassements nécessiterait une étude de compressibilité des matériaux constituant les digues,
- l'étanchéité et la continuité du mur sur une grande longueur demandent à être étudiées en fonction des tassements différentiels possibles.

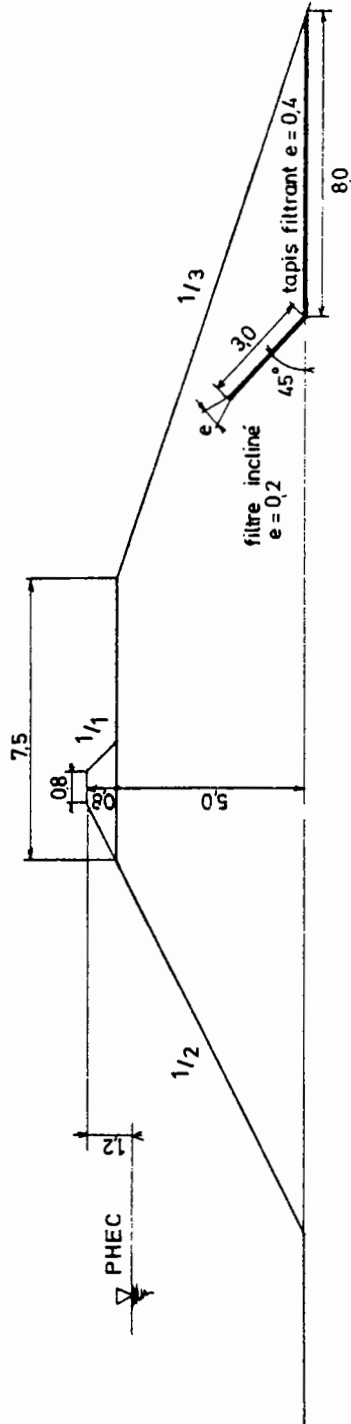


Figure n°1 - Schéma de reprofilage type des digues de BLOIS-VIENNE

Profils	PE. 1	PE. 2	PE. 3	PE. 4
Cote PHEC (NGF)	73,03 m	72,70 m	72,50 m	71,47 m
Réhausse plate-forme	+ 0,8 m	+ 0,9 m	+ 0,9 m	+ 1,4 m
Largeur totale de la plate-forme	7,5 m	7,5 m	7,5 m	7,5 m
Largeur totale de base (augmentation)	30 m (+ 10,5m)	32 m (+ 10,5m)	24 m (+ 11,5m)	25 m (+ 11,0m)
Largeur utile, plate-forme	4 mètres			
Adoucissement talus Aval	pente actuelle \geq 0,5 - pente préconisée \approx 0,33			
Création d'une banquette en crête du talus amont	Hauteur : 0,8 m - Largeur en crête : 0,8 m - Largeur à la base \approx 3,5 m			

TABLEAU III - Géométrie du reprofilage des digues

VIII - DEFINITION DU DRAINAGE DES DIGUES :

La définition du drainage d'une digue nécessite la conception et le dimensionnement d'un filtre en granulats élaborés ou en matières synthétiques.

Un filtre est constitué par une ou plusieurs couches de matériau perméable, disposé "à l'aval" d'un écoulement dans un massif et a pour but :

- de contrôler et canaliser l'écoulement en lui imposant un trajet,
- d'en évacuer l'eau,
- d'éviter une érosion régressive dans le massif, en empêchant les particules fines d'être emportées par l'eau s'écoulant sous un certain gradient.

VIII.1- Caractéristiques physiques des filtres :

VIII.1.1- Filtre en granulats élaborés :

La granulométrie du filtre doit être établie en fonction de celle du sol en place, selon des conditions que nous allons préciser

- Méthodes de calcul de la granulométrie d'un filtre

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la granulométrie d'un filtre en fonction du matériau à protéger.

a) Méthode préconisée par TERZAGHI :

Cette méthode considère le fuseau de variation granulométrique du sol à filtrer. Cependant, l'efficacité d'un filtre dépend de deux critères :

- .le filtre doit avoir des éléments assez fins pour retenir les gros éléments du sol de base. Le d_{15} du filtre doit être inférieur à quatre fois le d_{85} du sol le plus fin :

$$\text{soit } d_{15} \text{ filtre } < 4 \cdot d_{85} \text{ sol}$$

.../...

NOTA

d_n = dimension de tamis à travers lequel passe un pourcentage n en poids des grains.

- si le d_{15} du filtre est trop voisin du d_{15} du sol à protéger, sous l'action du gradient hydraulique auquel peut être soumis ce dernier, les éléments fins du sol et du filtre pourront passer à travers les gros éléments du filtre. Le d_{15} du filtre doit être au moins égal à quatre fois le d_{15} du sol le plus gros en contact avec le filtre :

$$d'où \quad d_{15} \text{ filtre} > 4 \cdot d_{15} \text{ sol}$$

En résumé, le filtre doit satisfaire granulométriquement à la double condition suivante :

$$4 \cdot d_{15} \text{ sol} < d_{15} \text{ filtre} < 4 \cdot d_{85} \text{ sol} \quad [1]$$

En outre, la courbe granulométrique du filtre doit être uniforme donc :

$$\frac{d_{60}}{d_{10}} < 2$$

Enfin pour réduire les pertes de charges, on réalise le plus souvent des filtres à plusieurs couches, mais chacune des couches doit répondre à la condition [1] par rapport à la couche précédente. Ces filtres composites sont appelés des filtres progressifs. De plus, dans le cas d'un gradient hydraulique ascendant, ces filtres sont dits inversés.

b) Méthodes utilisées par le "U.S. BUREAU of RECLAMATION" :

Ces méthodes concernent deux types de filtres :

- filtre à granulométrie uniforme,
- filtre à granulométrie continue et étendue.

- Filtre à granulométrie uniforme :

Une granulométrie uniforme a un coefficient de HAZEN. $\frac{d_{60}}{d_{10}} < 2$.
La courbe granulométrique doit répondre aux conditions :

$$5 < \frac{d_{50} \text{ filtre}}{d_{50} \text{ sol}} < 10$$

.../...

- Filtre à granulométrie continue et étendue :

Une granulométrie continue et étendue a un coefficient de HAZEN.

$$\frac{d_{60}}{d_{10}} > 2$$

La courbe granulométrique du filtre doit satisfaire aux conditions suivantes :

$$12 < \frac{d_{50} \text{ filtre}}{d_{50} \text{ sol}} < 58$$

$$12 < \frac{d_{15} \text{ filtre}}{d_{15} \text{ sol}} < 40$$

Il faut éviter que le filtre renferme plus de 5 % d'éléments inférieurs à 80 microns. D'autre part, il faut exclure les éléments supérieurs à 65 ou 70 mm pour éviter la ségrégation de mise en place. Enfin la courbe granulométrique d'un tel filtre doit, d'une façon générale, être à peu près parallèle à celle du matériau de base.

c) Remarques :

Selon les matériaux dont on dispose, on choisit un filtre de granulométrie étroite ou étendue. Les filtres à granulométrie étendue sont moins perméables que les filtres à granulométrie uniforme.

- Méthodes de calcul du coefficient de perméabilité

Pour les filtres à granulométrie étroite constituée par des graviers et cailloux, on peut estimer l'ordre de grandeur de la perméabilité en fonction de la granulométrie par l'expression :

$$k_{(\text{cm/s})} = 50 \frac{d^2}{10} \text{ (cm)}$$

VII.1.2- Filtre en matériaux synthétiques :

Les filtres en matières synthétiques (polyester, polypropylène) pouvant convenir au drainage des digues, sont des filtres multicouches constitués dans le cas général par deux nappes filtrantes et/ou anticontaminantes et une nappe drainante.

a) Condition de filtration :

La condition de filtration implique un critère sur la porométrie et sur la perméabilité.

a.1- Critère sur la porométrie :

Si l'on désigne par O_{50} , le diamètre moyen des pores d'un géotextile le critère sur la porométrie s'exprime par une double inégalité :

$$d_{15} \text{ sol} < O_{50} \text{ géotextile} < d_{85} \text{ sol} \quad [2]$$

a.2- Critère sur la perméabilité :

Il est indispensable que le géotextile ait une perméabilité supérieure à celle du sol en place et qu'en outre la possibilité de colmatage du géotextile à long terme soit examinée.

Le perméabilité courante des géotextiles est supérieure à 1.10^{-3} m/s.

b) Condition de drainage :

Les géotextiles composites renferment une nappe drainante de forte épaisseur (10 à 30 mm), de forte perméabilité permettant d'évacuer les eaux filtrées.

La vérification de la capacité drainante du filtre composite doit tenir compte de sa compressibilité sous le poids des terres de couverture. Dans certains cas limites, il est possible d'adjoindre, au filtre composite en géotextiles, des drains agricoles qui présentent une grande souplesse longitudinale.

.../...

VIII.1.3- Puits de décharge :

Afin de donner au puits de décharge toute son efficacité, il est impératif que :

- les granulats filtrants respectent les critères énoncés au paragraphe VIII.1.2.

On peut améliorer la capacité drainante des puits en y incorporant des drains plastiques dont les dimensions des fentes ou des trous doivent répondre au critère suivant :

$$\frac{d_{85} \text{ du filtre autour du drain}}{\text{ouverture maximale dans le drain}} \geq 2$$

VIII.2- Disposition des filtres et des puits de décharge :

Pour le drainage d'une digue, trois dispositions sont envisageables (figure n°2).

- filtre subvertical ou légèrement incliné situé entre le talus aval actuel de la digue et la recharge aval. Il a pour objet de rabattre la surface libre d'écoulement afin d'éviter des résurgences dans le talus aval,

- filtre horizontal situé à la base de la recharge aval. Il a pour fonction d'évacuer les eaux provenant du filtre subvertical ou incliné, d'intercepter et d'évacuer les eaux provenant du sol de fondation et des puits de décharge si ces derniers sont situés sous le filtre horizontal,

- puits de décharge qui peuvent être implantés verticalement sous le filtre horizontal ou à l'aval de ce dernier. Les puits de décharge peuvent être remplacés éventuellement par une tranchée de décharge.

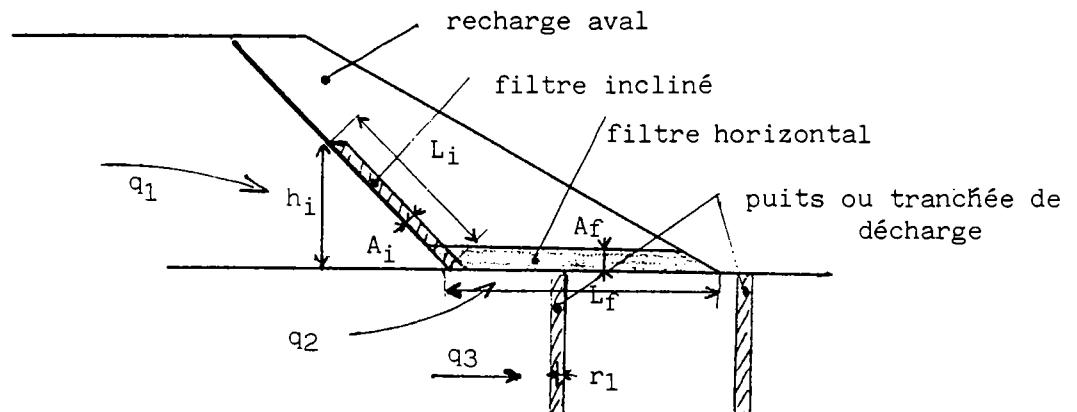


Figure n° 2 -
Dispositifs de drainage
d'une digue

VIII.3- Débit de fuite et capacité drainante des filtres :

Toute notre étude concerne des digues moyennement perméables fondées sur un sol perméable d'épaisseur limitée.

Pour ce cas de digue, il n'existe pas de solution mathématique, même approchée. Il est possible, comme l'indique SCHNEEBELI, de tracer la ligne de saturation comme si la fondation était imperméable, cette position étant la plus haute possible. Quant au débit de filtration à travers la digue, on peut obtenir un ordre de grandeur en additionnant le débit à travers une digue dans l'hypothèse d'une fondation imperméable et le débit de filtration sous la digue.

a) Calcul du débit de fuite à travers la digue :

Au stade de l'avant-projet de renforcement, et compte tenu du fait que le niveau piézométrique aval est mal défini, nous retiendrons un tracé rapide de la ligne de saturation qui conduit à un ordre de grandeur acceptable du débit de fuite.

Ainsi pour les besoins courants, le tracé de la ligne de saturation peut être fait à partir d'une méthode approchée, mais très rapide (figure n°3). Le point T' est localisé par $e = h/3$. Le point R est défini par $RA' = 0,3.n$, n étant la projection horizontale du talus mouillé amont. La ligne de saturation est assimilée à un segment de droite T'C', tracé sur la droite RT'. Le point C' est raccordé paraboliquement au point A'.

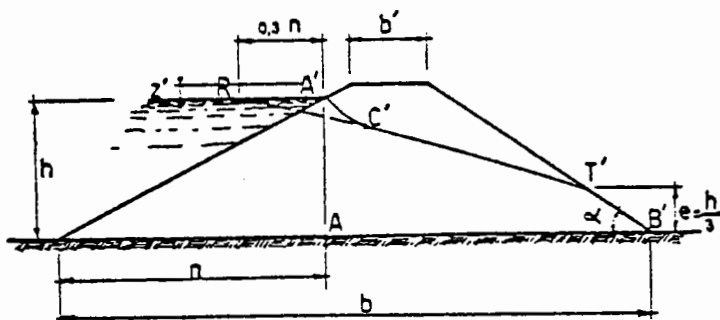


Figure n°3 - Tracé rapide de la ligne de saturation

Le débit filtrant à travers une tranche de 1m d'épaisseur est donné par :

$$q_1 = k_d \cdot \left(\frac{4 h^2}{9 L} \right) \quad [3]$$

avec L : longueur moyenne des lignes de courant

soit
$$L = \left(\frac{2}{3} h + 2 z' \right) \cdot \text{Cotg} \alpha + b' \quad [4]$$

k_d : coefficient de perméabilité de la digue.

b) Calcul du débit de fuite à travers le sol de fondation :

Ainsi au débit de filtration à travers la digue, on peut ajouter le débit sous la digue, estimé à partir de l'expression approchée suivante :

$$q_2 = k_a \cdot h \cdot \frac{d}{b + d} \quad [5]$$

avec :

h = la charge hydraulique

b = la largeur de base de la digue

d = épaisseur des alluvions perméables

k_a = coefficient de perméabilité des alluvions.

Cette expression simplifiée [5] est applicable pour $\frac{d}{b} \leq 0,5$, ce qui est toujours le cas dans l'étude qui nous préoccupe.

Le coefficient k_a considéré est le coefficient de perméabilité moyen d'un bicouche soumis à un écoulement d'eau parallèlement à la stratification. Il est donné par l'expression suivante :

$$k_a = \frac{\sum (e_i \cdot k_i)}{\sum e_i} \quad [6]$$

en désignant par e_i et k_i respectivement l'épaisseur et le coefficient de perméabilité d'une couche.

c) Capacité drainante d'un filtre incliné :

En désignant par q₁ le débit de fuite à travers la digue, par h_i la charge hydraulique au niveau du filtre incliné et par L_i et A_i respectivement la longueur et la section du filtre incliné, nous devons vérifier l'expression :

$$2 \cdot q_1 = k_i \left(\frac{h_i}{L_i} \right) \cdot A_i \quad [7]$$

Le chiffre 2 est un coefficient de sécurité sur le débit de fuite.

.../...

Une relation entre la charge H et l'épaisseur de saturation T du filtre est donnée par CEDERGREN sur la figure n°4 en fonction de l'inclinaison du filtre, avec k_f et k_s respectivement, coefficient de perméabilité du filtre et du sol.

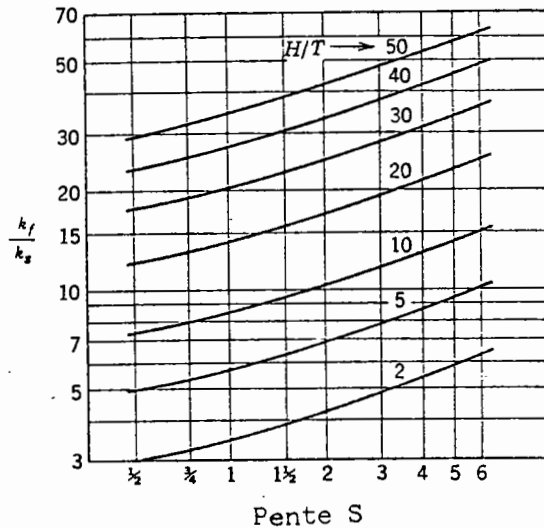


Figure n° 4

Relation entre la charge H et l'épaisseur de saturation T des filtres inclinés de pente S (d'après CEDERGREN)

d) Capacité drainante d'un filtre horizontal :

En désignant par q_2 le débit de fuite à travers les alluvions situées sous la digue, par h_f la charge hydraulique dans le filtre horizontal et par L_f et A_f respectivement la longueur et la section A_f du filtre horizontal, nous devons vérifier l'expression :

$$(q_1 + q_2) = k_f \left(\frac{h_f}{L_f} \right) A_f \quad [8]$$

En considérant que la charge maximale dans le filtre ne peut dépasser son épaisseur, alors pour une tranche de filtre de 1m il vient, $h_f = A_f$ d'où [8] s'écrit :

$$(q_1 + q_2) = k \frac{A_f^{-2}}{L_f}$$

.../...

et finalement l'épaisseur du filtre devient :

$$A_f = 2 \sqrt{\frac{L_f (q_1 + q_2)}{k_f}} \quad [9]$$

Le chiffre 2 est un coefficient de sécurité sur la capacité drainante.

e) Capacité drainante des puits de décharge :

En considérant que les puits de décharge absorberont le débit de fuite q_3 dans les alluvions très perméables, nous pouvons écrire :

$$q_3 = \frac{1,37 k_p d (h_2 - h_1)}{\log_{10} (r_2/r_1)} \quad [10]$$

avec :

k_p : coefficient de perméabilité du puits de décharge

h_2 : charge hydraulique à l'aval de la digue

h_1 : charge hydraulique dans le puits de décharge

r_2 : rayon d'action du puits de décharge pris égal au demi-espacement des puits

r_1 : rayon du puits de décharge

d : épaisseur des alluvions très perméables.

VIII.4- Applications aux cinq profils étudiés :

a) Calcul des débits de fuite :

Nous avons appliqué les expressions [3] - [4] - [5] et [6] pour le calcul des débits de fuite dans le cas des 5 profils étudiés. Les résultats sont présentés dans le tableau IV ci-après.

.../...

Profils		PE. 1	PE. 2	PE. 3	PE. 4	PE. 5
Charge hydraulique (1)		4,0 m	5,0 m	3,5 m	4,0 m	3,2 m
Débit de fuite à travers la digue	k_d	$0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$				
	L	13,5 m	14,7 m	13,0 m	13,5 m	21,6 m
	b'	7,5 m	7,5 m	7,5 m	7,5 m	14,0 m
	q_1	$0,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$0,04 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$0,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$0,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$0,01 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
Débit de fuite à travers les alluvions	k_f	$1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$6,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
	d	2,5 m	2,5 m	3,5 m	3,5 m	3,5 m
	b	21 m	23 m	18 m	18,5 m	25,0 m
	q_2	$0,07 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$0,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$0,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
Débit de fuite total	q_1+q_2	0,10 l/s	0,12 l/s	0,11 l/s	0,53 l/s	0,51 l/s
		9 m ³ /j	11 m ³ /j	10 m ³ /j	46 m ³ /j	45 m ³ /j

Tableau n° IV

Débits de fuite au droit des 5 profils étudiés

b) Caractéristiques et dimensions des filtres :

b.1- Filtre incliné entre le talus aval actuel de la digue et la recharge :

Le tableau IV indique que les débits de fuite à travers la digue peuvent varier entre 0,01 à 0,04 l/s par mètre linéaire de digue. Cependant la charge hydraulique (1) retenue dans le tableau IV comporte l'hypothèse suivante : le niveau d'eau aval est confondu avec la cote du terrain naturel. Toutefois, il faut noter que la cote du niveau de l'eau aval influence directement la position de la surface libre et la perte de charge.

Pour le dimensionnement du filtre, nous considérons les conditions maximales, soit celles du profil PE.2.

Avec les hypothèses de calcul suivantes :

$$q_1 = 0,04 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 144 \text{ l/h}$$

$$h_i = 3 \text{ m}$$

$$L_i = 4,3 \text{ m}$$

$$k_i = k_f = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s (sable graveleux) et } k'_i = k'_f = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$k_s = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s.}$$

et leur application dans l'expression [7] on obtient les résultants suivants :

- Cas d'un filtre en sable graveleux :

- . épaisseur nécessaire : 12 cm
- . capacité drainante : 300 l/h

- Cas d'un filtre en géotextile composite :

- . épaisseur nécessaire : 1,5 cm
- . capacité drainante : 360 l/h

.../...

REMARQUES :

1) Dans le cas d'un filtre en sable graveleux, la mise en oeuvre sur une épaisseur de 12 cm est peu compatible avec l'utilisation d'engins de terrassement. Toutefois, il existe actuellement des géotextiles confectionnés de façon à réaliser un réseau d'alvéoles hexagonales qui peuvent être remplies de sable graveleux par déversement du haut du talus. Ces alvéoles permettent de fixer le matériau drainant sur un talus avec une faible épaisseur.

2) Dans le cas d'un filtre en géotextile composite, la mise en oeuvre est simple et rapide. Il reste cependant à préciser l'épaisseur réelle du filtre en fonction de l'état de contrainte (compressibilité du filtre), de vérifier sa perméabilité et son colmatage éventuel.

3) Le filtre en sable graveleux n'est qu'un cas limite d'une recharge drainante. On remarque donc que l'on peut, moyennant la mise en place d'un filtre incliné, être moins exigeant sur la qualité des matériaux utilisés pour l'exécution de la recharge du talus aval.

b.2- Filtre horizontal ou tapis drainant :

Le tableau IV donne des débits de fuite globaux qui varient entre 0,10 et 0,53 l/s soit entre 9 et 46 m³/jour par mètre linéaire de digue.

Pour le dimensionnement préliminaire nous retiendrons le cas correspondant aux conditions maximales, soit le profil PE.4. Les hypothèses de calcul sont :

$$\begin{aligned}q_1 + q_2 &= 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \\k_f &= 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ m/s (graviers caillouteux 3/30mm)} \\L_f &= 8 \text{ m.}\end{aligned}$$

L'expression [9] donne $A_f = 28 \text{ cm}$ (A_f se réduit à 12 cm dans le cas d'un débit de fuite de 0,1m³/s).

REMARQUES :

1) Il est à noter que la mise en oeuvre d'une couche continue de 28 cm d'épaisseur présente des difficultés de réalisation, c'est pour ces raisons que l'on propose de retenir 40cm d'épaisseur globale avec la probabilité d'obtenir 30 cm d'une manière continue. Nous recommandons un blocage de l'extrémité du tapis drainant par des cailloux 30/100 mm.

.../...

2) Il est possible de remplacer le tapis drainant par un filtre synthétique en géotextile composite en une ou deux couches avec éventuellement l'incorporation de drains plastiques souples.

3) Le tapis drainant en granulats 3/30 mm nécessite une sous-couche en sable graveleux ou une couche de géotextile anticontaminante au niveau du terrain naturel.

4) Le coût du tapis drainant en géotextile composite devrait être très voisin de celui en graviers-cailloux. Cependant son avantage réside dans la souplesse d'utilisation.

c) Caractéristiques et dimensions des puits de décharge :

Avec les hypothèses suivantes :

- . $h_2 - h_1 = 0,5 \text{ m}$
- . $k_p = 1.10^{-3} \text{ m/s}$ (sable graveleux)
- . $r_1 = 0,1 \text{ m}$
- . $q_3 = 2 q_2 = 1.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- . $d = 3,5 \text{ m}$

l'expression [10] donne pour $r_2 = 20 \text{ m}$. Ce qui correspond à un puits de décharge de 20 cm de diamètre tous les 40 m.

d) Définition de la recharge :

La recharge a au moins 3 fonctions :

- 1) - rabattre la surface libre de l'écoulement, si l'on ne prévoit pas de drain incliné entre le talus aval actuel et la recharge. Dans ce cas, le matériau utilisé doit être perméable,
- 2) - créer un talus aval stable non soumis aux écoulements. Le matériau doit être essentiellement frottant et perméable en l'absence de drain incliné.

3) Surcharger le filtre horizontal et le sol sous-jacent pour compenser les poussées d'écoulement.

Pour cette surcharge on retiendra une largeur minimale de 2m de crête du talus aval et une pente de 1/3 pour un matériau non compacté et 1/2 pour un matériau compacté.

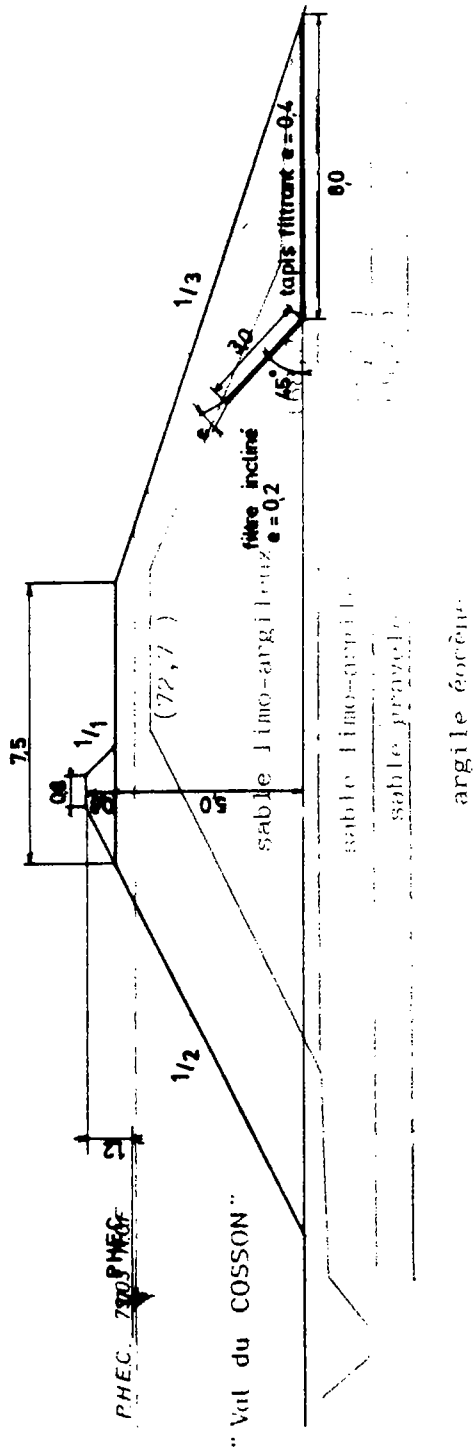
En conclusion de cette solution drainage aval, nous donnons ci-après en exemple, le reprofilage type de la figure n°1, page 18, transposé aux profils PE.1 - PE.2 - PE.3 et PE.4, soit aux Levées des Acacias, de Bas-Rivière et de Chailles

Nous avons présenté ces profils en favorisant une solution de reprofilage essentiellement coté Cosson, qui nous semble plus simple d'exécution qu'en milieu urbain (voir figures n° 5 - 6 - 7 et 8).

.../...

PROFIL D'ETUDE N° 1

Levée des Acacias



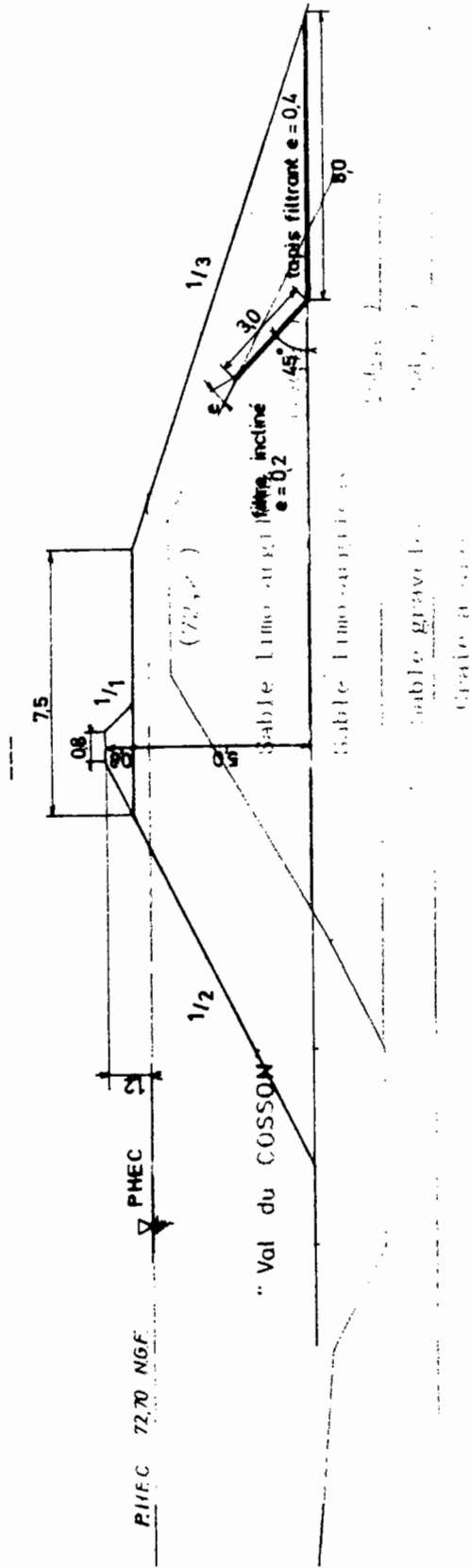
Plan de référence 50m NGF

Echelle 1/200

Figure n°5 - Exemple de reprofilage et de drainage aval au PE.1

PROFIL D'ETUDE N° 2

Levée des Acacias



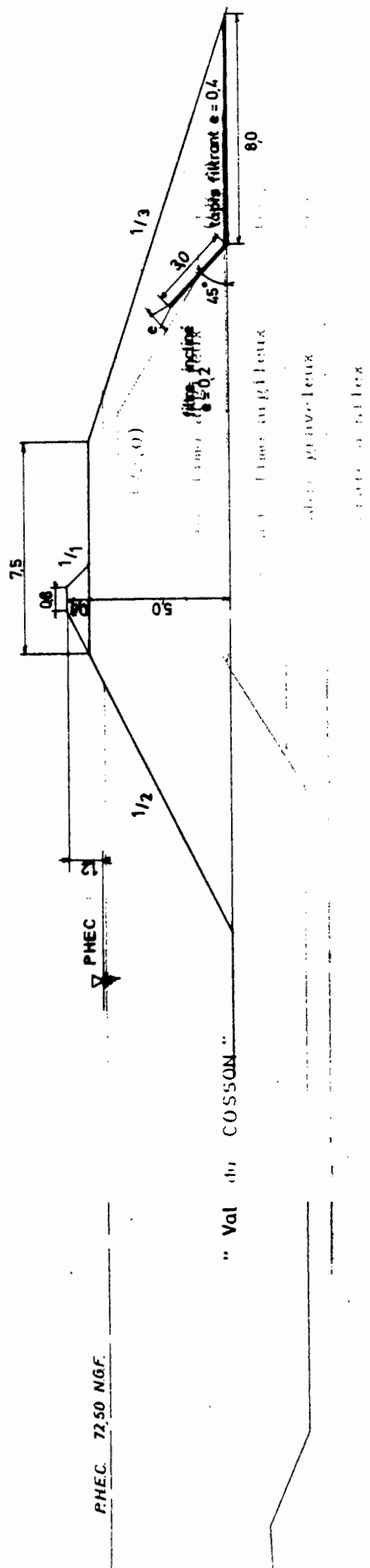
Plan de référence 50m NGF

Echelle 1/200

Figure n°6 - Exemple de reprofilage et de drainage aval au PE.2

PROFIL D'ETUDE N° 3

Levée de Bas-Rivière



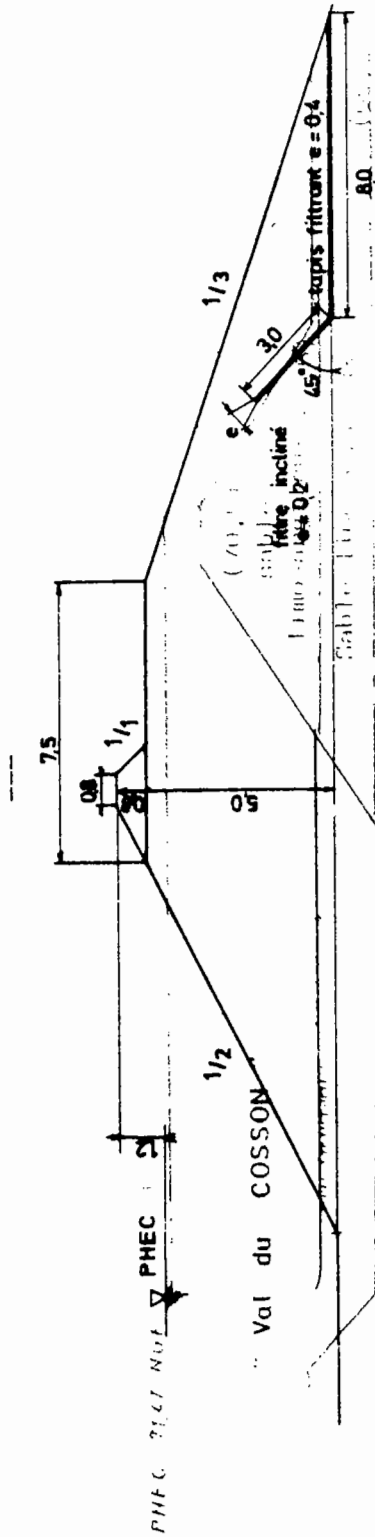
Plan de référence 50m NGF

échelle 1/200

Figure n°7 - Exemple de reprofilage et de drainage aval au PE.3

PROFIL D'ETUDE N° 4

Levée de Chaillies



Plan de référence 50m NGF

Echelle 1/200

Figure n°8 - Exemple de reprofilage et de drainage aval au PE.4

IX - DEFINITION DE L'ETANCHEMENT DES DIGUES :

Dans les applications concernant les digues de BLOIS-VIENNE, nous considèrerons le cas d'un étanchement global du corps de la digue et du sol de fondation. Pour cela nous retiendrons 2 principes généraux :

- 1 - étanchement des alluvions au droit du pied du talus amont et du corps de la digue le long du talus amont,
- 2 - étanchement du corps de la digue et des alluvions selon un plan vertical situé entre la crête amont et l'axe de la levée.

IX.1- Etanchement des alluvions et du talus amont :

Pour ce type d'étanchement nous envisageons trois variantes :

- 1) - le rideau de palplanches sur la hauteur des alluvions et pose de dalles de béton le long du talus amont,
- 2) - une paroi en coulis ou béton plastique ou paroi mince en coulis sur la hauteur des alluvions et revêtement du talus amont avec, soit une membrane étanche, soit une couche d'argile peu plastique surmontée d'une terre engazonnée ou d'enrochements,
- 3) - un noyau étanche en argile corroyée.

IX.1.1- Rideau de palplanches - dalles béton :

Nous avons pris en considération cette solution du fait que la D.D.E. pouvait disposer d'environ 3000 plaques en béton armé de 3x4x0,17m, présentant une surface élémentaire de 12 m² et un poids unitaire de 50 KN.

En considérant en moyenne une longueur de talus de 12m, on peut donc placer 3 dalles de 4m selon la pente du talus, ce qui permettrait de traiter 3 km de digue. Ces dalles seraient posées sur une couche de matériaux drainants et un lit de mortier. Les joints seraient obturés avec un mastic bitumineux.

Par contre, pour l'étanchement des alluvions, nous proposons un rideau de palplanches encastrées dans le substratum et éventuellement ancrées en tête si les conditions d'affouillement l'exigeaient. La longueur du rideau serait au maximum de l'ordre de 5m. Si les conditions de stabilité l'imposaient on pourrait envisager des rideaux alternés, c'est-à-dire renforcés à intervalles réguliers par des profils plus résistants.

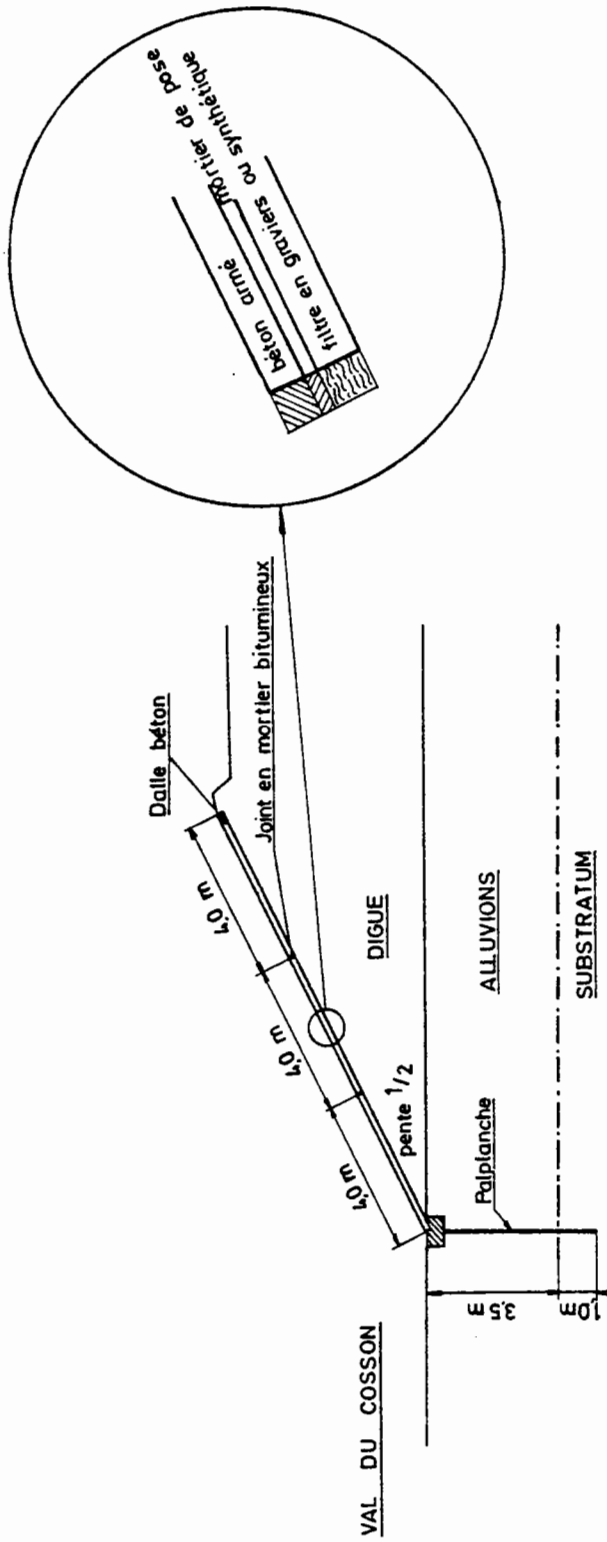


Figure n°8 - Schéma de principe d'un étanchement amont au moyen d'un rideau de palplanches et de dalles béton.

L'exécution d'un tel étanchement nécessite au préalable un recalibrage de la digue. Les dimensions à retenir peuvent être plus faibles au niveau de la plate-forme. Cependant on peut parfaitement envisager un recalibrage du côté du Cosson avec des matériaux essentiellement stables sans prendre en considération le critère de perméabilité.

IX.1.2- Paroi en coulis et revêtement étanche souple du talus amont :

Dans ce cas, le talus amont serait revêtu d'une membrane étanche (à définir) ou d'une couche d'argile peu plastique d'une épaisseur de 2 à 5 m.

Pour éviter les sous-pressions lors de la décrue, on disposerait en sous-face un matériau drainant et en surface une protection du type engazonnement ou enrochement. L'étanchéité sur la hauteur des alluvions serait assurée par une paroi mince au coulis de ciment binaire ou ternaire, dont la composition peut être définie à la demande, et des moyens d'exécution originaux peuvent être envisagés tel que le recours à une trancheuse.

Toutefois comme pour le cas précédent, un recalibrage de la levée est indispensable et ceci avec des matériaux stables.

IX.1.3- Noyau étanche :

Dans la solution "recalibrage côté Cosson", il est envisageable d'exécution le long du talus amont actuel et sur la hauteur des alluvions, un noyau étanche en argile corroyée, qui serait situé, en fin de travaux, à l'intérieur de la digue.

IX.2- Etanchement vertical de la digue et des alluvions :

Pour ce genre d'étanchement, nous retenons deux variantes :

- 1) - paroi mince exécutée du haut de la levée, traversant la digue, les alluvions et présentant un léger ancrage dans le substratum,
- 2) - rideau de palplanches traversant la digue, les alluvions et pénétrant légèrement dans le substratum.

.../...

IX.2.1- Paroi mince :

- - - - -

Une telle paroi mince peut être exécutée par fonçage au vibreur d'un profilé I.P.N. et par injection continu d'un coulis binaire ou ternaire dans le vide créé lors de l'arrachage du profilé. La formulation des coulis peut être définie au niveau du projet détaillé.

La hauteur du traitement serait en moyenne de 10m pour les Levées des Acacias, de Bas-Rivière et de Chailles et de 12,5m pour la Levée du CD.751.

Il est à noter que le recours à la paroi mince impose un recalibrage préalable de la digue et de la plate-forme pour permettre aux grues d'y circuler librement.

Ce procédé a été utilisé pour l'étanchement de nombreuses digues comme par exemple la Levée de St-Eloi le long de la Loire à NEVERS.

Nous avons présenté une telle solution sur la figure n°10 dans le cas de la Levée du CD. 751.

IX.2.2- Rideau de palplanches :

- - - - -

La solution palplanches présente une particularité par rapport aux autres solutions, elle permet d'éviter un recalibrage systématique des levées.

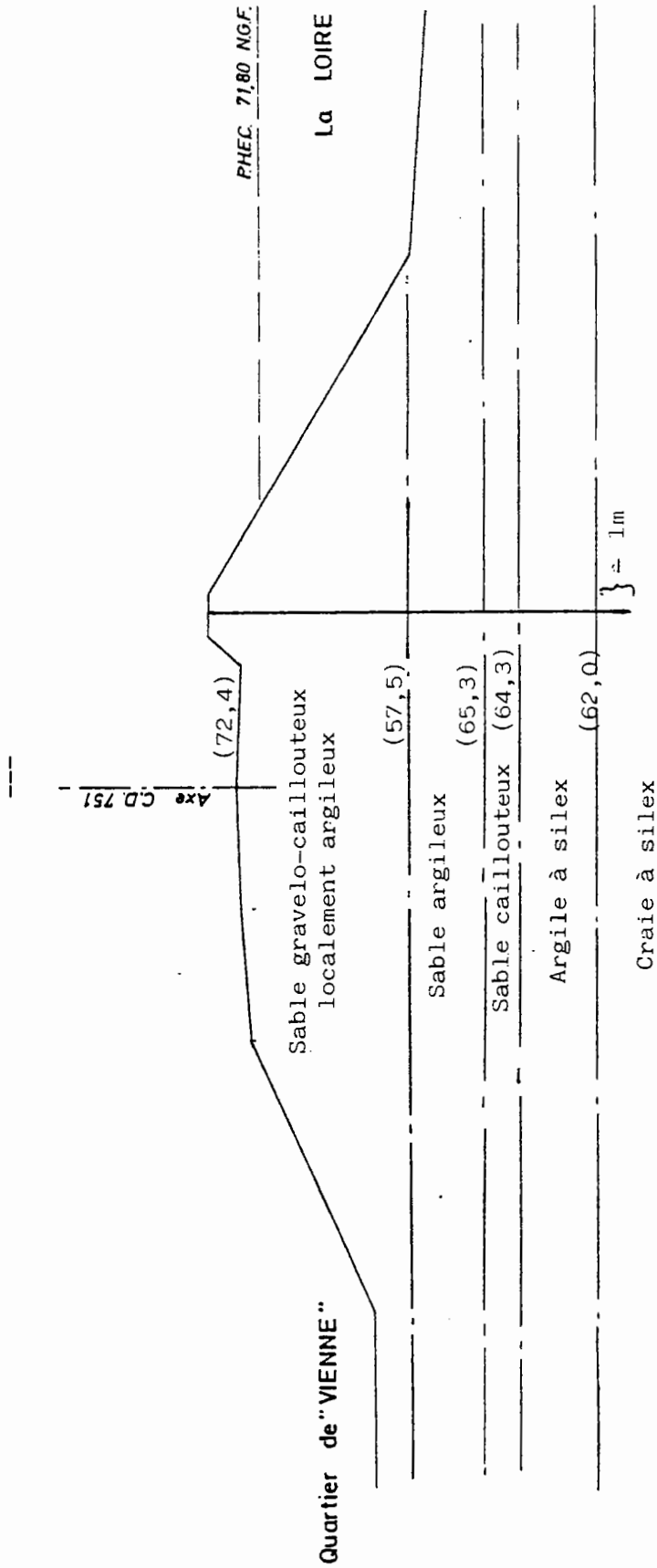
En effet, la largeur minimale de la digue pourrait être définie par les dimensions nécessaires au massif de butée.

En outre, on pourrait se permettre, avec certains aménagements paysagers, de prolonger les palplanches au-dessus de la plate-forme, et satisfaire ainsi à la condition de non déversement en cas des PHEC. Nous avons figuré la solution rideau de palplanches sur les figures n° 11 - 12 - 13 et 14 respectivement pour les profils PE.1 - PE.2 - PE.3 et PE.4, sans modifier la géométrie de la digue, bien que celle-ci doive être adaptée au projet. Comme pour la paroi mince, la longueur des palplanches serait comprise entre 10 et 12,5 m.

.../...

PROFIL D'ETUDE N° 5

Levée du CD.751



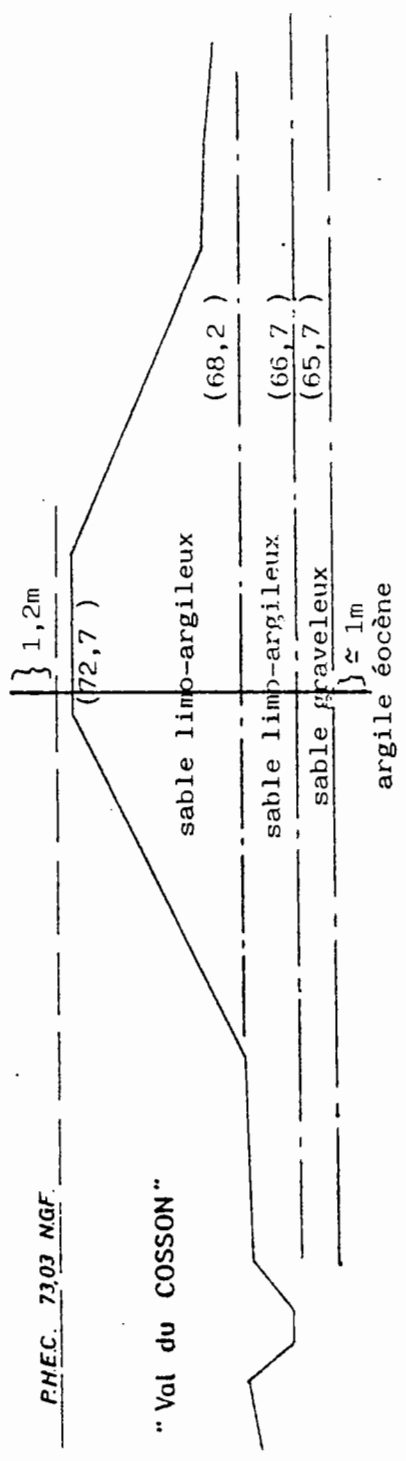
Plan de référence 50,0 m NGF

Echelle 1/200

Figure n°10- Solution paroi mince - Levée du CD. 751

PROFIL D'ETUDE N° 1

Levée des Acacias



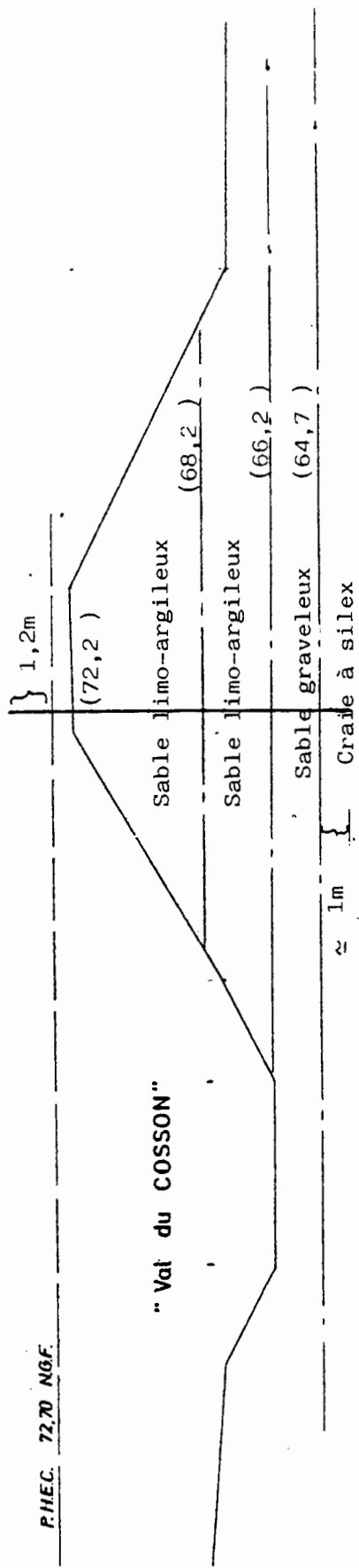
plan de référence 50m NGF

Echelle 1/200

Figure n°11 - Solution rideau de palplanches au PE.1

PROFIL D'ETUDE N° 2

Levée des Acacias



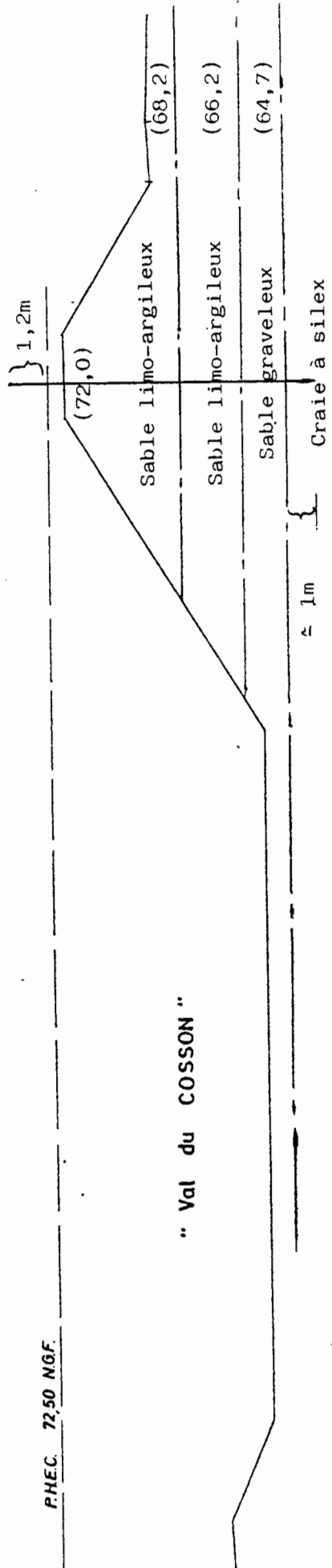
Plan de référence 50m NGF

Echelle 1/200

Figure n°12 - Solution rideau de palplanches au PE. 2

PROFIL D'ETUDE N° 3

Levée de Bas-Rivière



R.H.C. 72,50 NGF.

" Val du COSSON "

± 1m

Craie à silex

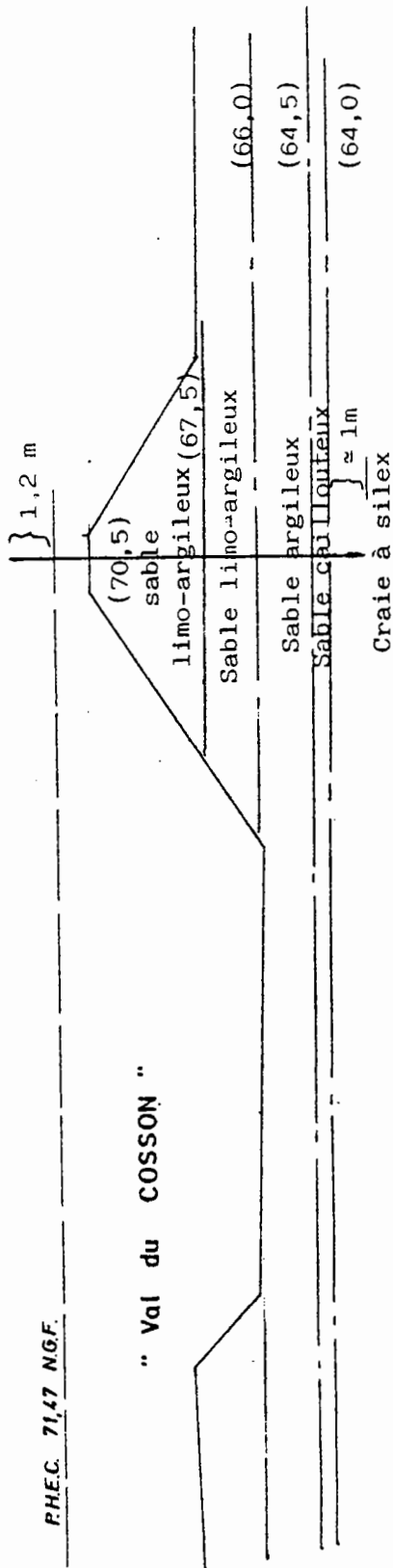
Plan de référence 50m NGF

Echelle 1/200

Figure n°13 - Solution rideau de palplanches au PE. 3

PROFIL D'ETUDE N° 4

Levée de Chailles



Plan de référence 50m NGF

Echelle 1/200

Figure n°14 - Solution rideau de palplanches au PE. 4

X - CONCLUSIONS :

La présente étude du renforcement des digues de BLOIS-VIENNE situées au Sud-Ouest de l'Avenue WILSON, nous a permis de préciser les points suivants :

1) Les Levées des Acacias, de Bas-Rivière et de Chailles sont submersibles en cas de crues. Elles doivent être réhaussées. Nous avons développé la condition de non-submersion au paragraphe VII en considérant une revanche de 1,2m par rapport aux PHEC. On peut retenir deux méthodes de renforcement :

- le reprofilage avec des matériaux stables, compactés et peu perméables,
- le rideau de palplanches, améliorant d'une part l'étanchéité de la digue existante et des alluvions sous-jacentes, et d'autre part permettant d'atteindre une cote égale à celle des PHEC augmentée de 1,2m de revanche.

2) Les Levées des Acacias, de Bas-Rivière, de Chailles et du CD.751 sont instables lors des crues, à causes des infiltrations tant à travers la digue que par les alluvions. Leur renforcement est envisageable selon l'un des deux principes suivant (voir § VI) :

- drainage du talus aval (voir § VIII),
- étanchement de la digue et des alluvions (voir § IX).

3) Suite à cette étude, nous proposons pour BLOIS-VIENNE un renforcement du type étanchement.

La justification de ce choix repose sur les considérations suivantes :

- BLOIS-VIENNE en cas de crue est une île protégée de toutes parts par des digues. Aussi, le projet doit tenir compte du niveau d'eau qui se développera à l'intérieur de BLOIS-VIENNE, car de lui dépendront les infiltrations à travers les digues et les alluvions ainsi que les conditions de fonctionnement des filtres (exutoire aval).

- La solution drainage des talus aval va amplifier les arrivées d'eau de l'ordre de 20 m³/jour par mètre linéaire de digue.

- La rupture d'un tronçon de digue de la Levée des Acacias peut annuler l'effet stabilisateur du drainage aval pour les digues situées au Sud-Est, et le déferlement des flots peut conduire à une rupture généralisée par érosion rapide des talus aval constitués par du sable graveleux.

4) En fonction des tronçons de digues, nous préconisons les solutions d'étanchement suivantes :

a) Levées des Acacias et de Bas-Rivière :

- - - - -

Compte tenu de la forte probabilité d'avoir des courants incidents, nous avons retenu un étanchement du talus amont par des plaques de béton et celui du sol de fondation par des palplanches ou une paroi souple (voir § IX.1.1). La digue serait au préalable recalibrée côté Cosson, ce qui permettrait de combler les nombreuses fosses situées au pied amont de ces levées.

b) Levée de Chailles :

- - - - -

Compte tenu de sa géométrie réduite et dans un souci de limitation des terrassements, nous proposons un rideau de palplanches (voir § IX.2.2) traversant la digue et les alluvions. Ce rideau de palplanches aurait son arase supérieure située à 1,4m au-dessus du sol pour satisfaire à la condition de non-déversement. Cependant, il faudra vérifier si la géométrie actuelle de la digue permet d'assurer la stabilité générale du rideau en cas de crue.

Il est également envisageable une digue en terre avec un noyau étanche descendu jusqu'au substratum (voir § IX.1.3).

c) Levée du CD. 751 :

- - - - -

L'étanchement de cette levée pourrait être assuré par une paroi mince au coulis de ciment (voir § IV.2.2). Il serait souhaitable de combler au préalable les fosses situées au pied aval de cette levée dans sa partie Sud-Est.

5) Remarques :

a) Si l'ensemble des digues étaient étanchées jusqu'au substratum argileux ou crayeux, il serait nécessaire de prévoir dans les digues, à des endroits judicieusement déterminés, des ouvrages de décharge qui permettraient de faciliter l'évacuation des eaux d'infiltration de BLOIS-VIENNE lors de la décrue de la Loire.

.../...

b) pour le revêtement en dalles de béton armé de la Levée des Acacias et de Bas-Rivière, il est indispensable de prévoir un tapis drainant en sous-face. Pour des questions de simplicité de mise en oeuvre, il est possible d'avoir recours à des géotextiles.

c) pour le reprofilage des digues, il est possible d'utiliser des matériaux de perméabilité quelconque, à condition qu'ils puissent présenter à long terme un angle de frottement interne de l'ordre de 35°. On peut admettre ainsi des matériaux de déchets de carrières de calcaire ou des matériaux marno-calcaires de découverte de ces carrières.

d) la présente étude permet de faire un choix d'une solution pour chacun des tronçons des levées. Pour l'élaboration du projet définitif, il sera nécessaire de disposer des éléments complémentaires ci-après :

- 1- direction et vitesse du courant à proximité des levées ?
- 2- type de renforcement retenu ?
- 3- comblement des fosses existantes ?
- 4- niveau d'eau à retenir dans BLOIS-VIENNE lors d'une crue étalée, maintenue à la cote des PHEC ?

Nous restons à la disposition de la D.D.E. pour tout renseignement complémentaire souhaité et pour préciser au niveau du projet le dimensionnement, la stabilité et les conditions d'exécution.

BLOIS, le 4 Décembre 1981
l'Assistant,
Chef de la Section
"Mécanique des Sols"


E. WASCHKOWSKI

BLOIS, le 7 Décembre 1981
VU et PRESENTE par le
Directeur du Laboratoire,


M. CHAMPION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CONSULTÉES POUR CETTE ÉTUDE

- [1] - POST et LONDE - Les barrages en terre compactée -
Gauthier Villars 1953

- [2] - TERZAGHI et PECK - Mécanique des sols appliquée - DUNOD - 1957

- [3] - NEDECO - Considérations théoriques concernant la stabilité des digues
de la Loire lors des niveaux d'eau exceptionnellement élevés -
Delft Juin 1965.

- [4] - G. SCHNEEBELLI - Hydraulique souterraine - EYROLLES - 1966

- [5] - HARRY R. CEDERGREN - Seepage, drainage and flow nets
John Wiley and sons, inc - NEW-YORK 1967

- [6] - Laboratoire Régional des Ponts-et-Chaussées de BLOIS -
 . Etude du renforcement des digues de la Loire dans le Département
 du LOIRET, références M. 390 - 1971 et M. 716 - 1975

 . Etude du renforcement des digues de la Loire dans le Département
 du CHER, référence M. 860 - 1977

- [7] - VERDEYEN, ROISIN et NUYENS - Application de la mécanique des sols -
Tome II - DUNOD 1971

- [8] - G. JAMME - Travaux fluviaux - EYROLLES 1974

- [9] - J. LARRAS - Défense contre les crues - EYROLLES 1975.