

Diagnostic et analyse de risque appliqués aux digues du Rhône autour de Lyon

Jean Claude Carré et Pierre Agresti

En collaboration avec le Service de navigation Rhône-Saône : arrondissement Aménagement Entretien et Exploitation, cellule Hydraulique.

Le territoire de la communauté urbaine de Lyon (Grand Lyon) est particulièrement concerné par le risque inondation. Les dispositifs de protection comme les digues peuvent représenter d'autres risques spécifiques en cas de rupture, en fonction de leur situation et des territoires situés en aval.

L'étude, réalisée pour le compte du SNRS (Service de navigation Rhône-Saône), a pour objet de caractériser les risques à l'aval des différents dispositifs (digues, remblais routiers...) protégeant totalement ou partiellement certains territoires de la communauté urbaine de Lyon des débordements du Rhône et de la Saône.

Le déroulement de l'étude comprenait trois phases distinctes :

- la collecte de données et analyse technique du risque de rupture sur les différents ouvrages ;
- la détermination des aléas dus aux éventuelles ruptures de digues ;
- l'évaluation des dommages potentiels.

Le présent article ne concerne que la première phase.

Les risques de rupture

La zone d'étude relativement vaste a nécessité la mise en œuvre d'une méthode de diagnostic rationnelle permettant d'identifier les digues les plus vulnérables aux différents risques de rupture.

Le guide technique « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations », rédigé par le Cemagref en 2001 (Mériaux *et al.*, 2001) et réalisé à l'initiative du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, est à la base de la méthodologie adoptée.

Les différentes causes de rupture d'une digue sont les suivantes :

- la surverse (c'est la principale cause) ;
- l'érosion externe ;
- l'érosion interne ;
- la rupture d'ensemble (c'est la cause la moins fréquente).

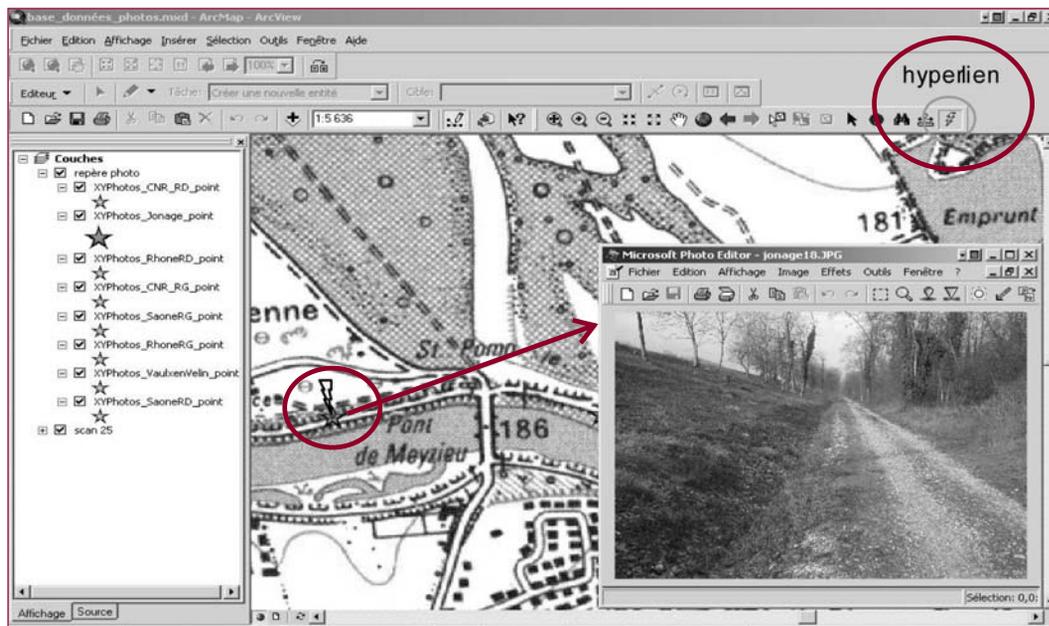
Les différentes phases de l'analyse

- Recueil et analyse des données (ArcView® – MapInfo® – base de données existante, figure 1).
- Reconnaissance détaillée sur le terrain et premier « diagnostic ».
- Caractérisation des digues en distinguant :
 - la géométrie (hauteur, largeur en crête, fruits) ;
 - la protection : revêtements externes, structure interne (paroi mince...), protection de pied... ;
 - l'état des ouvrages ;

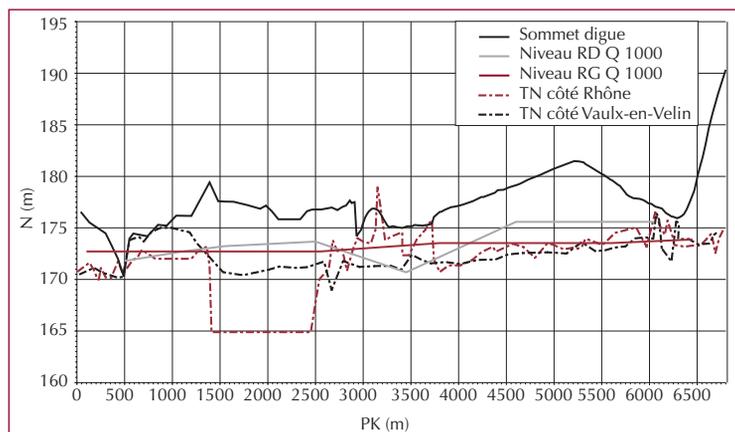
Les contacts

Sogreah,
6, rue de Lorraine,
38130 Échirolles

► Figure 1 – Base de données ArcView®.



▼ Figure 2 – Profils en long des digues de l'A42 et rocade Est et ligne d'eau pour Q₁₀₀₀.

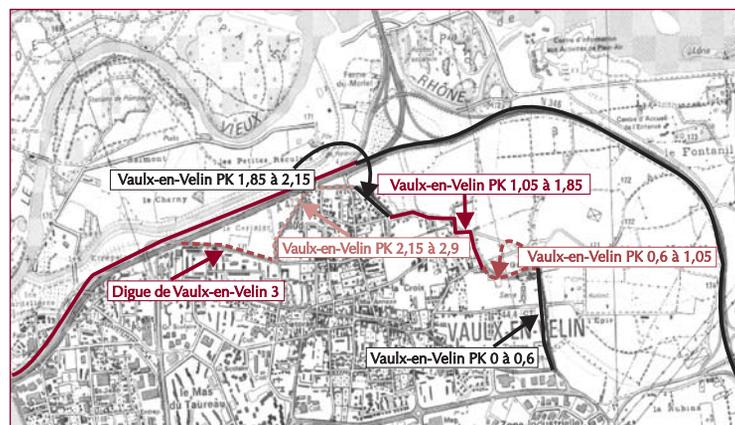


– l'historique des interventions et incidents connus ;

– les contraintes hydrauliques (3 crues de référence : 100 ans, 200 ans, 1 000 ans), issues des résultats de calcul de la CNR (figure 2).

Il en ressort un ensemble de tronçons homogènes, présentés sur la figure 3.

- Analyse du risque pour chaque tronçon homogène. Ce risque doit être établi à partir des données générales et sans étude approfondie et détaillée de la structure de la digue.
- Définition des scénarios de rupture.



▲ Figure 3 : Extrait de la carte des tronçons homogènes.

L'analyse du risque pour chaque tronçon

On associe à chaque tronçon de digue homogène et à chaque type de rupture un facteur de risque (*FR*) tel que :

$$\text{Facteur de risque} = \frac{\text{note de contrainte}}{\text{note de résistance}}$$

Nous avons introduit pour chaque crue un facteur de risque global qui donne une note d'ensemble pour chaque tronçon de digue, prenant en compte la probabilité d'occurrence des différents types de rupture de digues, l'événement largement prédominant étant la rupture par surverse et le plus anecdotique la rupture d'ensemble.

La note de facteur de risque global est donnée par la relation suivante :

$$FR_{global} = 1 \times \frac{FR_{surverse}}{(FR_{surverse})_{max}} + 0,10 \times \frac{FR_{érosion}}{(FR_{érosion})_{max}} + 0,10 \times \frac{FR_{renard}}{(FR_{renard})_{max}} + 0,025 \times \frac{FR_{rupture}}{(FR_{rupture})_{max}}$$

Le FR maximal vaut donc 1,25.

La note de résistance

La note de résistance (dénominateur de FR) dépend des caractéristiques physiques de la digue :

- ses dimensions (R1) ;
- sa structure interne et externe (R2) ;
- l'état de la digue (R3).

Au final : note de résistance = $R1 \times R2 \times R3$.

NOTE R1 (DIMENSIONS DE LA DIGUE)

- Pour la rupture par surverse

Note de résistance :

$$R1 = 0,5 \times \text{fruit}_{\text{amont}} + 1 \times \text{fruit}_{\text{aval}} + 1,5 \times \frac{1}{H}$$

Car la largeur de crête (l) et les fruits sont des facteurs stabilisants et la hauteur de digue (H) est un facteur déstabilisant en cas de surverse. La pondération permet d'exprimer le poids qu'a chacun de ces paramètres vis-à-vis de la résistance.

- Pour la rupture par érosion externe

Note de résistance :

$$R1 = \text{fruit}_{\text{eau}} + \frac{1}{H}$$

Car la largeur de crête et le fruit côté cours d'eau sont des facteurs stabilisants, alors que la hauteur de digue est un facteur déstabilisant.

- Pour la rupture par érosion interne

Note de résistance :

$$R1 = (\text{fruit}_{\text{aval}} \times H_{\text{digue}} + l)^2$$

Car l'érosion est proportionnelle au carré de la vitesse de l'eau dans la digue, donc au carré du gradient hydraulique H/L .

Ainsi, le terme résistant est L^2 .

Or $L \cong \text{fruit}_{\text{aval}} \times H_{\text{digue}} + \text{largeur en crête}$.

où $H = (\text{Zeau amont} - \text{Zeau aval})$ ou $(\text{Zeau amont} - \text{Z TN})$,

et $L =$ parcours de l'eau dans la digue.

- Pour la rupture d'ensemble

Note de résistance :

$$R1 = \text{fruit}_{\text{talus immergé}}$$

Car le terme résistant est la valeur du fruit du talus immergé.

NOTE R2 (STRUCTURE DE LA DIGUE)

La note R2 est la somme des notes attribuées au type de revêtement et à la structure interne de la digue. Pour chaque mode de rupture, les critères internes et externes ont été évalués selon le barème détaillé dans le tableau 1 (page 98).

NOTE R3 (ÉTAT DE LA DIGUE)

La note R3 est le produit des notes attribuées à chaque type de désordre observé sur la digue. Pour chacun des désordres, considérés dans le tableau ci-après, la note sera d'autant plus faible que son occurrence est forte. Ainsi l'absence de désordre équivaut à une note de 1. Et la note 0 correspond à une digue totalement instable.

La note de contrainte

La note de contrainte (numérateur de FR) dépend des conditions hydrauliques imposées à la digue pour chaque crue traitée.

POUR LA RUPTURE PAR SURVERSE

Note de contrainte = érosion en crête + érosion du parement aval.

Le phénomène d'arrachement des grains en crête est approché à partir de la formule d'Isbach sous la forme :

$$d < \frac{v^2}{m^2 \cdot 2g \cdot \Delta} = 0,14 \times H_s$$

Où m , Δ et d sont respectivement le coefficient de position, la densité et la dimension caractéristiques des grains du matériau constituant la digue.

On suppose que l'écoulement est en régime critique sur la crête et H_s est la charge amont (figure 4) mesurée à partir du niveau de crête ($H_s = \text{Zeau} - \text{Zcrête}$).

	Surverse	Érosion externe	Érosion interne	Rupture d'ensemble	
				amont	aval
Béton	30	5	10		8
Maçonnerie	15	3	10		8
Enrochements	10	0	8		8
Herbe	3	0	2		3
Géotextiles	4	0	2		3
Recharge-Drain de pied	2	0	6		6
Terre nue	1	0	2		3
	Total			Total	
Béton	6	30	10	8	
Maçonnerie	4	20	10	8	
Enrochements	2	20	5	8	
Herbe	0	3	2	3	
Géotextiles	1	4	0	3	
Recharge-Drain de pied	0	2	2	6	
Terre nue	0	1	2	3	
	Total			Total	
Béton	30				
Asphalte	20				
Herbe	3				
Terre nue	1				
Total					
Paroi mince			20	5	
Zonage	5	5		5	
	Total			Total	

▲ Tableau 1 – Barème d'attribution de la note R2 : structure de la digue.

État de la digue	Surverse	Érosion externe	Érosion interne	Rupture d'ensemble	
				amont	aval
État en crête	De 0 à 1				
État talus aval	De 0 à 1				De 0 à 1
État talus amont	De 0 à 1	De 0 à 1		De 0 à 1	
Présences d'arbres et de souches à l'aval	De 0 à 1		De 0 à 1		
Présences d'arbres et de souches à l'amont	De 0 à 1		De 0 à 1		
Présence de terriers			De 0 à 1		
Présence de canalisations			De 0 à 1		
Présence de fontis (fuites)			De 0 à 1		
	Total			Total	Total

▲ Tableau 2 – Barème d'attribution de la note R3 : état de la digue.

Le phénomène d'arrachement des grains du parement côté val est approché de la même manière, en supposant un régime d'écoulement uniforme en pied de talus.

$$d < \frac{v^2}{m^2 \cdot 2g \cdot \Delta} = 0,33 \times \frac{K^{1,2} \cdot H_s^{1,2}}{fruit^{0,6}}$$

où K = coefficient de Strickler du talus aval.

Dans le cadre de l'étude, nous avons adopté les valeurs de Strickler présentées dans le tableau 3.

Globalement la note de contrainte relative à l'érosion par surverse s'exprime par la relation suivante :

$$Note\ de\ contrainte = 0,14 \times H_s + 0,33 \times \frac{K^{1,2} \cdot H_s^{1,2}}{fruit^{0,6}}$$

POUR LA RUPTURE PAR ÉROSION EXTERNE

$$Note\ de\ contrainte = G \cdot V^2$$

où V = vitesse tangentielle du courant,

et G = coefficient de courbure du lit, déterminés suivant la figure 5.

POUR LA RUPTURE PAR ÉROSION INTERNE

Le facteur de risque est proportionnel au carré de la vitesse de l'eau dans la digue.

Or V est proportionnelle au gradient hydraulique H/L,

où H = (Z_{eau} amont – Z_{eau} aval) ou (Z_{eau} amont – Z_{TN}),

et L = parcours de l'eau dans la digue.

Donc ce facteur de risque est proportionnel au terme, sans dimension, H²/L². L² exprimant la note de résistance vis-à-vis de la rupture par renard, on assimile la note de contrainte au terme H², qui caractérise la contrainte hydraulique. Ainsi pour l'érosion interne, on considère que :

$$Note\ de\ contrainte = H^2$$

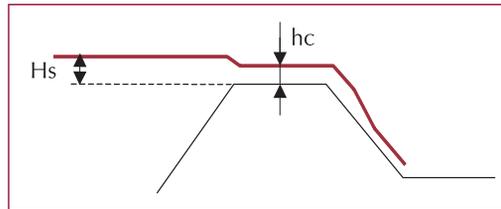
POUR LA RUPTURE D'ENSEMBLE

$$Note\ de\ contrainte = \frac{\Delta Z_{eau}}{H_{digue}} \times \frac{1}{temps\ de\ décrue}$$

Car ce risque est proportionnel à la vitesse de décrue et inversement proportionnel à la hauteur de la digue.

RÉSULTATS

Les résultats des différentes notations sont présentés sous la forme de graphique à barres, permet-



◀ Figure 4 – Représentation de la charge amont Hs et du niveau de crête.

Revêtement	K
Béton	90
Maçonnerie	70
Terre nue	50
Herbe	20
enrochement	10

◀ Tableau 3 – Valeurs de Strickler du talus aval (en m^{1/3}/s).

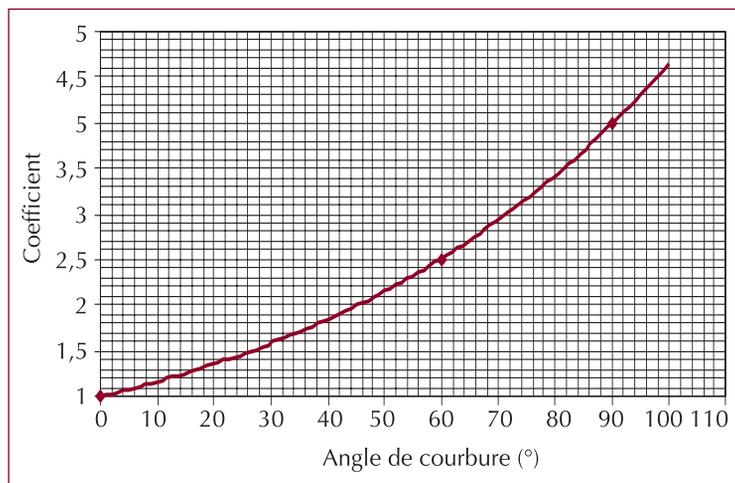
tant de visualiser les tronçons critiques du système de protection. Les graphiques représentant les notes de résistance, les notes de contraintes et les facteurs de risque sont présentés respectivement sur les figures 6, 7 et 8 (page 100).

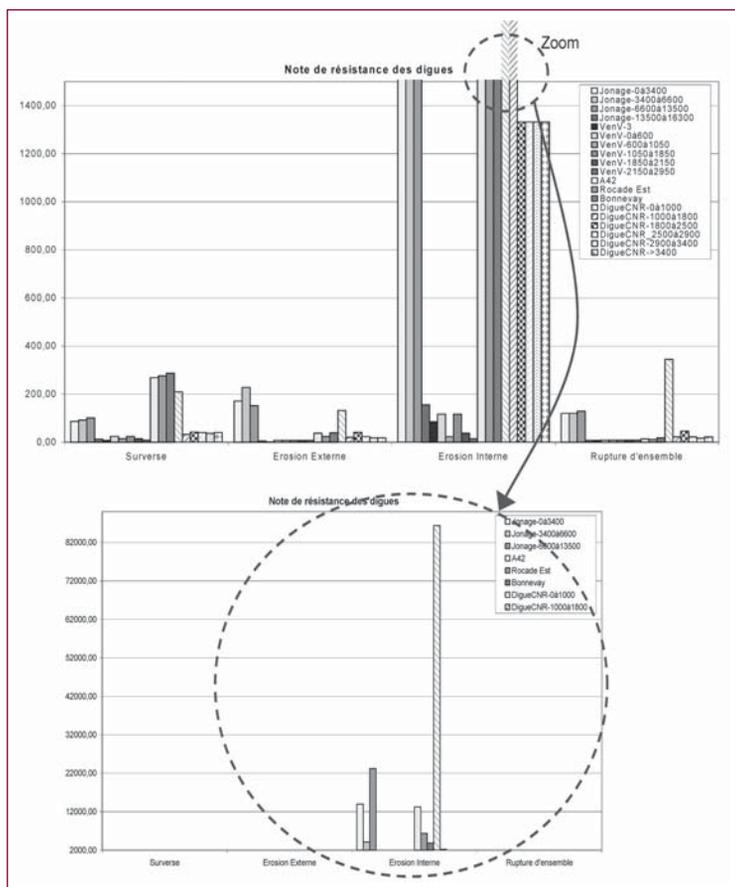
Cartographie

Afin de représenter spécialement le niveau de risque de rupture, nous avons adopté une présentation cartographique graduée en 4 niveaux :

- risque relatif faible ;
- risque relatif moyen ;
- risque relatif fort ;
- risque relatif très fort.

▼ Figure 5 – Coefficient de courbure du lit.





▲ Figure 6 – Graphique des notes de résistance (en réalité, la classification est représentée par 19 niveaux chromatiques non restitués ici).

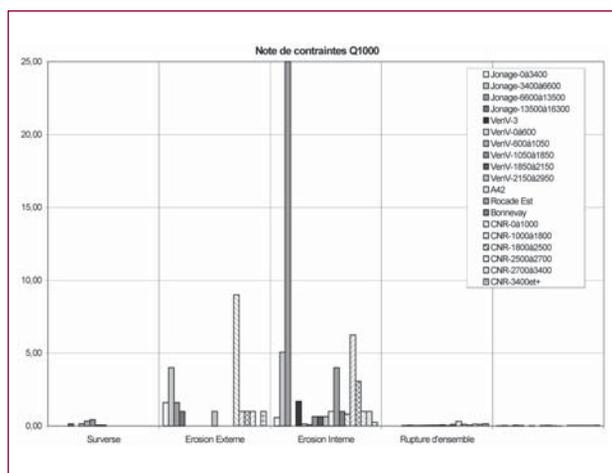
Cette cartographie représentera le facteur de risque global. Les valeurs prises par ce facteur sont relatives et cette relativité diffère d'une crue à l'autre.

En général, on utilise des intervalles réguliers pour définir les niveaux dans les cartes d'aléas. Par exemple, pour les aléas liés aux inondations, chaque changement de niveau correspond à une augmentation de 50 cm de la hauteur d'eau. Néanmoins, dans le cadre de cette étude où le risque lié à la surverse est prépondérant, nous proposons d'attribuer le risque relatif le plus grand aux facteurs de risque supérieurs à la valeur maximale qu'ils peuvent atteindre en l'absence de surverse (alors $FR_{global\ max} = 0,225$). Les 3 niveaux inférieurs de risque seront déterminés, plus classiquement, en découpant régulièrement l'intervalle où FR_{global} prend des valeurs inférieures à 0,225.

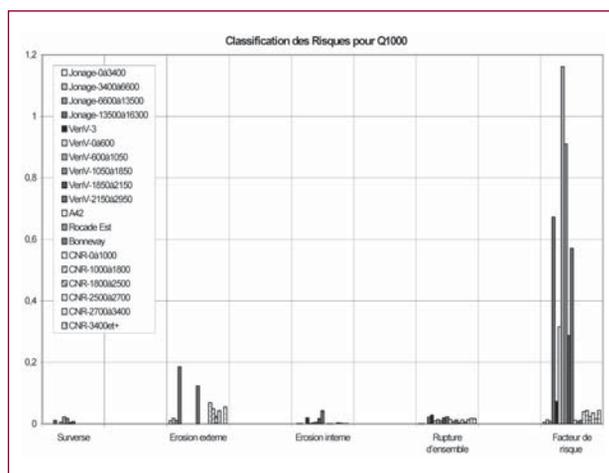
Ainsi, on obtient :

- $0 < FR_{global} < 0,075$ risque relatif faible ;
- $0,075 < FR_{global} < 0,15$ risque relatif moyen ;
- $0,15 < FR_{global} < 0,225$ risque relatif fort ;
- $0,225 < FR_{global} < 1,225$ risque relatif très fort.

Les figures 9 et 10 présentent, à titre d'exemple, deux cartes représentant respectivement pour la crue millénaire et pour la crue centennale, le classement de plusieurs tronçons de digues. Ces cartes ont été établies à partir des résultats de l'application à ces digues de l'analyse comparative présentée ci-dessus.



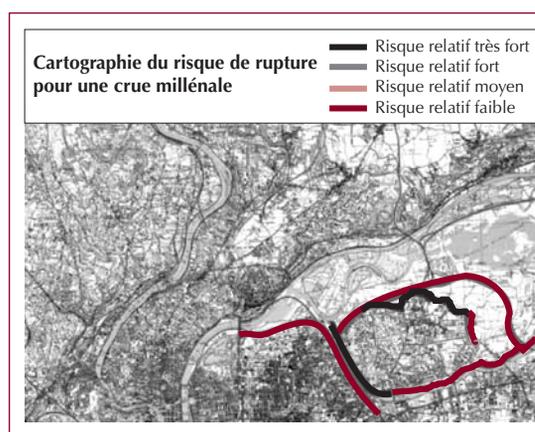
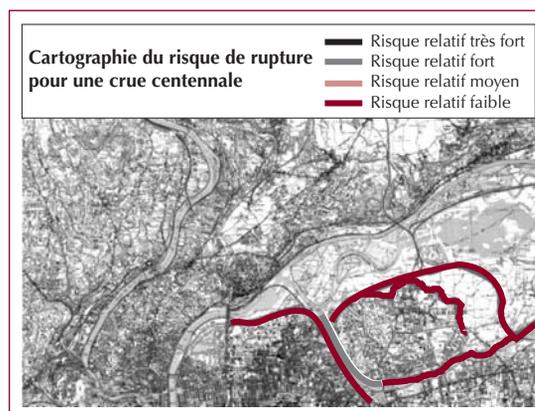
▲ Figure 7 – Graphique des notes de contraintes pour la crue millénaire (en réalité, la classification est représentée par 19 niveaux chromatiques non restitués ici).



▲ Figure 8 – Graphique des facteurs de risques pour la crue millénaire (en réalité, la classification est représentée par 19 niveaux chromatiques non restitués ici).

Conclusion

L'étude de diagnostic des digues du Rhône et de la Saône protégeant le territoire urbain du Grand Lyon a débouché sur l'identification rationnelle des tronçons de digues présentant le plus de risques. La méthodologie appliquée a permis de concentrer les études ultérieures des scénarii de rupture sur ces objectifs prioritaires. □



► Figures 9 et 10 – Classement du risque de rupture pour les crues centennale et millénaire.

Résumé

L'article présente la méthode d'évaluation des risques de rupture de digue appliquée dans le cadre de l'étude pour la prévention des risques liés aux digues du Rhône et de la Saône sur le territoire de la communauté urbaine de Lyon. Cette méthode permet d'identifier de manière rationnelle les digues présentant le plus de risques, sur une vaste zone d'étude.

Abstract

The paper expose the method of risk assessment applied in the frame of Study for the prevention of risks due to the dikes along the Rhone and the Saône rivers in the Lyon metropolitan area. This method allows identifying rationally the most critical dikes of a large study area.

Bibliographie

- MÉRIAUX, P., ROYET, P., FOLTON, C., 2001, *Surveillance, Entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, Guide Pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*, Cemagref Éditions, 199 p.
- MÉRIAUX, P., ROYET, P., LINO, M., 2000, *Méthodologie de diagnostic des digues appliquées aux levées de la Loire moyenne*, Cemagref Éditions, 232 p.
- FRY, J.-J., DEGOUTTE, G. *et al.*, 1997, Érosion interne : typologie, détection et réparation, Comité français des grands barrages, *Barrages et réservoirs*, Bulletin n° 6 spécial congrès CIGB Florence.

Photo : Patrice Mériaux (Cemagref)

