

# Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations

3<sup>e</sup> colloque – Dignes 2019  
20-21 mars 2019 – Aix-en-Provence

Sous la direction de  
Rémy Tourment et Laurent Peyras





**Digues maritimes  
et fluviales de protection  
contre les inondations**

ISBN : 978-2-7592-3001-3

Le contenu des articles est disponible sur Zenodo

<https://zenodo.org/communities/digues-2019>

Site du colloque : <https://digues2019.irstea.fr>

# Digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations

*3<sup>e</sup> colloque – Dignes 2019*

20-21 mars 2019 – Aix-en-Provence

*Sous la direction de*  
Rémy Tourment et Laurent Peyras





## ORGANISATEUR



## PARTENAIRES



## PARTENAIRE POUR LA VISITE D'OUVRAGES



## AVEC LE SOUTIEN DE







# Table des matières

Introduction.....	13
Comités.....	15
<b>Thème 1. Réglementation et organisation .....</b>	<b>17</b>
Intégration d'un remblai multi-usages dans un système d'endiguement – Modalités de mise à disposition et de gestion.....	19
<i>C. Navarro, J. Lemaire</i>	
Modes de gestion et responsabilités des ouvrages de lutte contre l'érosion et la submersion marine en Occitanie.....	21
<i>D. Boulet, M.E. Giunta Fornasin, H. Heurtefeux</i>	
SIRS Dignes V2 : Le logiciel métier coopératif pour les professionnels de la gestion des digues (et cours d'eau).....	23
<i>J. Perrin, V. Platz, A. Castagnet, S. Patouillard, R. Tourment</i>	
Prise en compte de l'incertitude dans la réglementation relative aux digues. Retour d'expérience sur le bassin versant de l'Arve (Haute-Savoie) .....	25
<i>F. Charles</i>	
Compétence GEMAPI – Application à une digue de protection contre les inondations du fleuve Var .....	27
<i>P. Richert</i>	
Une communauté internationale sur les digues .....	29
<i>R. Tourment, E. Sossenkina, M. Bottema, P. Peeters, R. Pohl, A. Rushworth, J. Simm, M. Van</i>	
Diffuser les connaissances sur les digues : deux exemples d'outil .....	31
<i>C. Curt, H. Félix, P Di Maiolo, R. Tourment, J. Perrin, P. Broust, S. Mortier</i>	
<b>Thème 2. Ouvrages et systèmes de protection et stratégies de gestion des risques d'inondation.....</b>	<b>33</b>
Mitigation des inondations causées par les rivières de plaine en zones urbaines : méthodes et exemples de solutions. ....	35
<i>R. Slomp, L. Deroo</i>	
Protection contre les inondations du projet de la Technopole de Fom El Oued (Maroc), une évidence ?.....	37
<i>D. Mazel, M. Fernex, C. Meunier</i>	
Le système d'endiguement de Sartrouville et Montesson – un projet conciliant prévention des inondations, gestion des milieux aquatiques et intégration urbaine .....	39
<i>D. Calvar, R. Croix</i>	
Protection de l'agglomération chambérienne contre les crues. Travaux de la confluence Leysse-Hyères.....	41
<i>B. Chalus, C. Moiroud, R. Granjon, C. Guay, R. Jalinoux</i>	
Étude du devenir des remblais de second rang dans le val d'Authion aval.....	43
<i>O. Barbet, J. Rousselot, V. Gaspari</i>	

Analyse de la performance d'un système d'endiguement complexe Exemple de Châtelailon-Plage.....	45
<i>J. Dugor, E. Ageorges, M. Dupont, J. Baills, D. Rihouey</i>	
Projet « Isère amont » : 16 Champs d'Inondation Contrôlée (CIC) le long de l'Isère.....	47
<i>O. Manin, A. Le Peillet, C. Denizot, L. Boutonnier</i>	
Retours d'expérience d'études préliminaires d'aide à la décision pour la définition des systèmes d'endiguement .....	49
<i>J. Savatier, G. Gonzalez, A. Darthos, E. Capdevielle, C. Huveteau, S. Galabrun, S. Marliac</i>	
Révision du système d'endiguement de Portiragnes-plage.....	51
<i>G. Sénéchal, M.H. Prost, A. Salmi, S. Théron</i>	
Digues maritimes des Moutiers-en-Retz – Système d'endiguement et stratégie de protection.....	53
<i>A. Tardieu, F. Eenselme, A. Boulay</i>	
Digue de protection du village de Codolet contre les inondations du Rhône et de la Cèze .....	55
<i>P. Soulat, A. Bonnafé, S. Bayart, S. Boissin</i>	
La digue multifonctionnelle : une alternative pour intégrer le risque d'inondation dans l'aménagement urbain.....	57
<i>A.-L. Moreau</i>	
La prévention des inondations, protection ou adaptation ?.....	59
<i>S. Bidault</i>	
Les terres dans les systèmes d'endiguement de la Loire.....	61
<i>S. Patouillard, J. Maurin, P. Mériaux, R. Tourment, B. Beullac</i>	
Caractérisation de systèmes d'endiguement à l'heure de la GEMAPI - application au territoire de l'agglomération troyenne .....	63
<i>A. Brune, B. Beullac, P. Mériaux</i>	
<b>Thème 3. Connaissance et modélisation des aléas naturels.....</b>	<b>65</b>
<hr/>	
Détermination du niveau de protection des systèmes d'endiguement en milieu maritime .....	67
<i>C. Trmal, Y. Deniaud, L. Cuvillier, P. Lebreton</i>	
Aide à la surveillance des digues maritimes : les systèmes de vigilance submersion.....	69
<i>A. Tardieu, O. Barbet, J. Berthelot, B. Seurot</i>	
Mesures <i>in situ</i> d'impact de vague sur une digue composite.....	71
<i>P.A. Poncet, S. Abadie, B. Larroque, B. Liqueur, D. Sous</i>	
Développement d'Atlas de zones inondables et de modèles de propagation de débits, au service de la gestion des ouvrages en crue .....	73
<i>B. Jacopin, F. Mercier, E. Andries, Y. Beureno</i>	
Projet de R&D DIGUE 2020 : réalisation d'une plateforme de recherche en site maritime pour l'étude des actions de la mer sur les digues, la durabilité, et la perception du risque de submersion. ....	75
<i>T. Faisant, L. Peyras, C. Jeannot, A. Tekatlian, S. Gendrey, C. Chevalier, M. De Baecque, A. Schleyer-Lindenmann, R. Bertoldo, C. De Paris, T. Mallet</i>	

Impact de brise-lames détachés poreux émergents sur l'énergie de la houle à la côte .....	77
<i>G. Arnaud, V. Rey, J. Touboul, D. Sous</i>	

#### **Thème 4. Connaissance et modélisation des modes de rupture, des mécanismes et scénarios de défaillance des ouvrages et des systèmes..... 79**

---

Caractérisation expérimentale du comportement mécanique des sols pulvérulents érodés par suffusion .....	81
<i>C.D. Nguyen, N. Benahmed, P. Philippe</i>	
Sensibilité à la suffusion, de l'échantillon à l'ouvrage .....	83
<i>D. Marot, F. Bendahmane, R. Gelet, V.T. Le, L. Zhang, C. Zhong</i>	
Durabilité d'un sol traité à la chaux en environnement maritime : méthodologie de l'étude et premiers résultats .....	85
<i>M. De Baecque, C. Chevalier, M. Le Feuvre, S. Palma Lopes, P. Reiffsteck</i>	
Évaluer l'impact du vieillissement des digues sur les mécanismes et scénarios de rupture .....	87
<i>Y. Boussafir, R. Tourment, G. Veylon, E. Durand, L. Saussaye, P. Reiffsteck</i>	
Modèle d'évaluation de la performance des digues soumises à la présence de végétation arborescente – cas de l'érosion interne.....	89
<i>G. Bambara, C. Curt, P. Mériaux, L. Peyras, R. Tourment, M. Vennetier, P. Vanloot</i>	
Essais de surverse <i>in situ</i> et quantification de la résistance à l'érosion.....	91
<i>S. Bonelli, S. Nicaise, G. Charrier, N. Chaouch, F. Byron, Y. Gremeaux</i>	
Simulation numérique d'un essai de surverse .....	93
<i>S. Jeuck, G. Charrier, F. Golay, S. Bonelli</i>	
Modélisations du développement d'une brèche par surverse et du transport sédimentaire associé.....	95
<i>A. Paquier</i>	
Accidentologie des digues du delta du Rhône de 1840 à nos jours.....	97
<i>T. Mallet, J.J. Fry, R. Tourment, P. Mériaux</i>	
Retour d'expérience sur 10 années de réalisation d'essais d'érosion sur des sols provenant d'ouvrages hydrauliques .....	99
<i>R. Beguin, C. Moras, M. Boucher, C. Vinay, J.-R. Courivaud, P. Pinettes, C. Picault</i>	
Analyse de sensibilité des paramètres de rupture des digues : Application au cas de la Garonne.....	101
<i>L. Pheulpin, V. Bacchi, N. Bertrand</i>	

#### **Thème 5. Aide à la décision – ouvrages : reconnaissances, surveillance, auscultation, diagnostic, des digues et ouvrages associés..... 103**

---

Bief de Montambert : analyse de mécanismes de rupture de digues dans les argiles à silex du bassin parisien.....	105
<i>S. Mével, T. Noblet, R. Clavel</i>	
Auscultation d'un barrage en terre soumis à érosion, du diagnostic aux travaux de confortement .....	107
<i>N. Le, B. Chalus, P. Serve</i>	
Fusion d'informations géophysiques et géotechniques acquises sur banc d'essai pour application au diagnostic de digues.....	109

<i>T. Dezert, S. Palma Lopes, Y. Fargier, Q. Forquenot de la Fortelle, P. Côte, R. Tourment</i>	
Conception et installation d'un système de surveillance innovant pour des digues de protection contre les crues du Rhône .....	111
<i>C. Guidoux, T. Mallet, J-R. Courivaud, D. Chaussée</i>	
DIDRO, un outil intégré pour l'auscultation des digues par drone .....	113
<i>D. Boggio, J-L. Sorin, M. Pierrot-Deseilligny, R. Tourment, G. Rabatel, R. Antoine, E. VanLiempt, J-F. Biscay, B. Albouze</i>	
Mise en place et exploitation d'un système de surveillance et d'alerte des populations sur les digues du Sierroz.....	115
<i>R. Beguin, J.-R. Courivaud</i>	
De ScanPrint IMS à ALOHA V2018, histoire de transformation digitale pour la surveillance des endiguements CNR .....	117
<i>P-H. Faure, L. Duchesne, V. Morisseau, J. Brossard</i>	
Évaluation permanente de la sécurité des barrages, digues, réservoirs, voies navigables avec mesure par fibre optique .....	119
<i>V. Garau, R. Blin, D. Inaudi</i>	
Projet DIGUINTELLIGENT Recherche et développement d'une technologie de détection et de quantification d'écoulements dans les digues .....	121
<i>P. Chevrier, P. Coudray, P. Pezard, D. Neyens, J. Cousteau</i>	
Apport du contrôle non destructif et de la fusion des données au diagnostic d'ouvrages hydrauliques en terre en environnement côtier .....	123
<i>S. Gendrey, V. Garnier, P. Azemard, C. Payan</i>	
<b>Thème 6. Aide à la décision – systèmes : analyses de risque, analyses coûts/bénéfice, analyses multicritères.....</b>	<b>125</b>
<hr/>	
L'analyse de risque des systèmes endigués : méthodologie et application à la réalisation des études de dangers .....	127
<i>R. Tourment, B. Beullac, S. Patouillard, J. Maurin, Y. Quefféléan</i>	
Guide et cahier des charges pour la réalisation des études de dangers de système d'endiguement.....	129
<i>P. Ledoux, Y. Deniaud, C. Cambefort, B. Colin, C. Trmal, R. Tourment, B. Beullac</i>	
Spécificités des systèmes d'endiguement et de l'analyse de risque en contexte torrentiel .....	131
<i>Y. Quefféléan, S. Carlados, G. Piton, D. Kuss, M. Fouquet, R. Tourment</i>	
La modélisation hydraulique 2D globale dans le cadre d'un programme de fiabilisation des levées : exemple des vals de l'Orléanais .....	133
<i>L. Cuvillier, A. Bontemps, S. Braud, S. Patouillard</i>	
Études de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux dans le delta du Rhône .....	135
<i>T. Mallet, C. Dast, M. Requi, S. Chardès, A. Castagnet, J.J. Fry</i>	
Devenir de la digue maritime d'Erromardie (Saint-Jean-de-Luz) .....	137
<i>E. Tena, A. De Bonviller, B. Martinez, C. Huveteau</i>	
<b>Thème 7. Confortement et travaux sur les digues et ouvrages associés ...</b>	<b>139</b>
<hr/>	
Ouvrages de Protection contre les Crues à Sallèles d'Aude.....	141
<i>A. Plastre, G. Thouvenin</i>	

Retour d'expérience sur les renforcements des levées de Loire en « deep soil mixing » .....	143
<i>S. Patouillard, L. Saussaye, E. Durand, N. Manceau, A. Le Kouby, A. Coulet</i>	
Le recul stratégique des ouvrages de protection contre les inondations au service de la préservation et valorisation des milieux aquatiques	
Confortement de la digue sud d'Arles .....	145
<i>M. Normand, C. Delaunay, T. Mallet, P. Mercier</i>	
Retour d'expériences sur des travaux de réalisation d'ouvrages traversants sous digue .....	147
<i>M. Fernandes, M. Gilbert, J. Vanwarreghem, E. Vuillermet</i>	
Gestion des matériaux sur le projet « Isère amont » - Retour d'expérience de la tranche 1 achevée et des tranches 2 et 3 en cours.....	149
<i>J.-F. Frézet, O. Manin, L. Boutonnier, J.-P. Pinchart, A. Le Peillet, F. Dermenonville</i>	
Travaux de sécurisation de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques : retour d'expérience sur le suivi géotechnique d'exécution, sa supervision et son contrôle .....	151
<i>D. Chaussée, C. Delaunay, V. Perset, T. Mallet, P. Mercier</i>	
Chantier du remblai ferroviaire Arles-Tarascon : gestion de la sécurité en crue .....	153
<i>M. Sutter, R. Tourment, P. Pelt, B. Beullac, J.M. Bernard</i>	
La réhabilitation de la digue Carnot à Boulogne Sur Mer : Les particularités des travaux de confortement d'une digue en mer .....	155
<i>A. Raillard</i>	
Réhabilitation de la protection contre les inondations de Tarascon - un panel d'ouvrages variés: la digue de la Montagnette, le château Royal de Provence aux pieds dans le fleuve et un ancien quai .....	157
<i>M. Gilbert, E. Vuillermet, T. Mallet, P. Mercier</i>	
Travaux de confortement des quais du Rhône en traversée d'Arles.....	159
<i>M.H. Prost, A. Salmi, M. Normand, T. Mallet, P. Mercier</i>	
Digues résistantes en sol traité à la chaux : les apports du projet DigueELITE et les conséquences sur la conception.....	161
<i>N. Nerinx, S. Bonelli, G. Herrier, P. Tachker, D. Puiatti, F. Cornacchioli, S. Nicaise, D. Lesueur</i>	
BOREAL, Bio-renforcement des ouvrages hydrauliques en remblais .....	163
<i>A. Esnault Filet, I. Gutjahr, A. Garandet, A. Viglino, R. Beguin, O. Sibourg, J.M. Monnier, J. Martins, L. Oxarango, L. Spadini, C. Geindreau, F. Emeriault, S. Castanier Perthuisot</i>	
Solutions de traitement des essences ligneuses générant des risques sur les ouvrages hydrauliques .....	165
<i>C. Zanetti, N. Liency, J. Macia, C. Morris, M. Vennetier, P. Mériaux</i>	
Guide technique CFBR – Méthodes et techniques de confortement des digues .....	167
<i>D. Poulain, M. Sutter, R. Tourment, J. Maurin, N. Auger, C. Chevalier, Y. Deniaud, P. Ledoux, T. Mallet, J.C. Palacios, M. Pinhas</i>	
Protections externes de digues : un Groupe de travail du CFBR présente des méthodes de réparation et confortement.....	169
<i>P. Ledoux, E. Vuillermet, O. Artières, Y. Boussafir, B. Chalus, B. Cortier, T. Monier, A. Brune</i>	
Confortement de la digue du Grand Rhône – La solution géocomposite face aux matériaux sableux et granulaires .....	171

<i>A. Hérault, M. Normand, A. Skotarczak</i>	
Confortement des endiguements de la Rivière des Galets sur l'île de la Réunion – Conception et mise en œuvre de blocs artificiels attachés .....	173
<i>J. Vanwarreghem, F. Fruchart, J. Aubonnet, J.-B. Bruzy, A. Quanguin</i>	
Travaux de confortement de la digue des Alliés à Dunkerque .....	175
<i>X. Hamard, N. Nerincx, G. Brassart, C. Doumeng, A. Moubariki, S. Partouche</i>	
Projet d'aménagement du Port de Brest .....	177
<i>R. Matras, C. Bennehard</i>	
Protection maritime d'un remblai ferroviaire en éléments modulaires renforcés par géotextiles, Saint-Laurent-d'Eze .....	179
<i>D. Rossi, O. Wyss</i>	
Retour d'expérience sur les travaux post-Xynthia en Pays de la Loire .....	181
<i>F. Leseur, F. Pondevie</i>	
Index des auteurs .....	183

---

# Introduction

La communauté scientifique et technique, nationale et internationale, travaille depuis plusieurs décennies maintenant sur les problématiques liées aux digues de protection contre les inondations, comme en témoignent de nombreuses manifestations : le colloque technique « Sécurité des digues fluviales et de navigation » organisée par le CFBR et le MEDD à Orléans les 25 et 26 novembre 2004, le colloque scientifique et technique « Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions » organisées par Irstea avec le soutien du CFBR et du MTES à Aix en Provence du 12 au 14 juin 2013, les conférences internationales FLOODrisk 2008, 2012, 2016 et le congrès 2018 de la CIGB à Vienne (Autriche).

Ce nouveau colloque international et francophone se tient un an après la prise en charge de la compétence GEMAPI, nouveau cadre organisationnel et réglementaire pour la gestion et la sécurité des systèmes de protection contre les inondations, et la montée en puissance correspondante des collectivités territoriales qui en sont chargées.

Ce colloque permet de faire le point en particulier sur :

- les avancées dans la mise en œuvre de ce nouveau cadre réglementaire et de l'organisation des gestionnaires et des autorités compétentes,
- le retour d'expérience d'événements récents,
- les projets récents ou en cours de conception ou de réalisation de confortements ou de construction d'ouvrages,
- les résultats et avancées en matière d'analyse, d'évaluation et de gestion des risques, d'analyse de la vulnérabilité et de la résilience des territoires et d'application dans les études de dangers des systèmes d'endiguements,
- les résultats et avancées techniques, technologiques et scientifiques dans les différents domaines géomécanique, génie civil et hydraulique, en lien avec les digues fluviales et maritimes, incluant les nouveaux référentiels et les résultats et avancées des nombreux projets de recherche récents ou en cours dans le domaine.





# Comités

## **Comité d'organisation**

### **Président**

Laurent Peyras Irstea

### **Coordination**

Dominique Breil Irstea

### **Membres**

Perrine Broust France Dignes

Amélie Maurin CFBR

Laetitia Rivollet BETCGB (MTES / DGPR)

Josiane Simonovici Irstea

Martine Sylvestre Irstea

Rémy Tourment Irstea

Sophie Ungaro Palais des congrès Aix en Provence

## **Comité scientifique**

### **Président**

Rémy Tourment Irstea

### **Membres**

Fabien Anselmet IRPHE / CNRS

Olivier Bory CFBR / EDF Savoie Technolac

Pierre Breul Université Clermont

Thomas Carlioz BETCGB (MTES / DGPR)

Eric Chaumillon Univ. La Rochelle, UMR CNRS 7266 LIENSs

Jean-Robert Courivaud EDF CIH

Gérard Degoutte CTPBOH

Christophe Delaunay SCP

Yann Deniaud Cerema

Laurence Duchesne CNR

Jean-Marc Flohr EGIS

Loïc Le Louargant CD76

Patrick Ledoux Cerema

Daniel Loudière SHF / CTPBOH

Thibaut Mallet Symadrem

Thierry Monier Artelia

Sérgio Palma-Lopes IFSTTAR

Sébastien Patouillard DREAL Centre

Laurent Peyras Irstea

Michel Pinhas AD IDR

Yann Queffélec ONF

Clément Rataud Communauté de Commune de l'Île de Noirmoutier

Vincent Rey Univ. Toulon

Laetitia Rivollet BETCGB (MTES / DGPR)

Nathalie Rosin-Corre Tractebel

Akim Salmi ISL

Robert Slomp Rijkswaterstaat (Pays-Bas)

Patrick Soulat Safege

Marc Vuillet EIVP



# Thème 1

## Réglementation et organisation

### Comité scientifique

#### *Animateurs de la session orale :*

Patrick Ledoux

Cerema

Michel Pinhas

SYMBHI

#### *Relecteurs :*

Patrick Ledoux (*Coordinateur*)

Cerema

Thomas Carlioz

BETCGB (MTES / DGPR)

Michel Pinhas

SYMBHI

Robert Slomp

Rijkswaterstaat



# **Intégration d'un remblai multi-usages dans un système d'endiguement Modalités de mise à disposition et de gestion**

## ***Integration of a multi-purpose embankment in a levee system - Methods of shared usage and management***

**C. Navarro<sup>1</sup>, J. Lemaire<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> SCE, Nantes, [christine.navarro@sce.fr](mailto:christine.navarro@sce.fr)

<sup>2</sup> SCE, Nantes, [jeremie.lemaire@sce.fr](mailto:jeremie.lemaire@sce.fr)

### **Résumé**

La Communauté de communes Cœur Côte Fleurie (4CF) est située sur le littoral du département du Calvados. Elle est constituée de 11 communes, les plus importantes étant Deauville, Trouville-sur-Mer, Touques et Villers-sur-Mer. Sa population permanente est d'environ 20 000 habitants et croît jusqu'à 120 000 habitants en période estivale.

Les lois de réformes territoriales attribuent une compétence obligatoire et exclusive au bloc communal en matière de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (GEMAPI), depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2018. L'article L. 211-7 I bis du code de l'environnement définit la compétence GEMAPI par renvoi aux items 1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup> et 8<sup>o</sup> du I, listant les missions du grand cycle de l'eau.

Préalablement à la prise de compétence GEMAPI, la 4CF a missionné le bureau d'études SCE et le cabinet SEMAPHORES en 2017 pour réaliser un état des lieux et un diagnostic organisationnel sur son territoire, afin de proposer différents scénarios de gouvernance pour l'exercice de la compétence.

Concernant la mission de « défense contre la mer » de la compétence GEMAPI, la 4CF a décidé de l'exercer en propre. À l'issue des études de pré-configuration réalisées par le bureau d'étude, ce dernier a proposé trois scénarios de définition du système d'endiguement. La 4CF a retenu le scénario proposant d'autoriser deux systèmes d'endiguement sur Villers-sur-Mer et Blonville-sur-Mer, dont l'un protège plus de 3 000 personnes, et l'autre environ 2 200 personnes.

La particularité de ces systèmes d'endiguement tient au fait qu'ils sont constitués d'un remblai routier sous propriété et gestion du Département du Calvados. Ce remblai n'a jamais été classé, il constitue une « digue par destination ». Comme le

prescrit la loi « MAPTAM » de 2014, une convention de mise à disposition à titre gratuit a été établie entre la 4CF et le Département du Calvados pour fixer les droits et engagements des maîtrises d’ouvrage respectives sur le remblai servant de route départementale et de digue, les modalités de la coordination des opérations, ainsi que leurs responsabilités.

Après avoir dressé la situation de la communauté de communes et le cadre juridique de la compétence GEMAPI, la présente communication s’attache à présenter les caractéristiques des systèmes d’endiguement sur le territoire de la 4CF, le scénario organisationnel choisi pour leur gestion, ainsi que les détails pratiques de mise à disposition du remblai routier dans le cadre de la convention. Cette communication permet de dresser le bilan des démarches et des échanges engagés par la 4CF pour la mise en place de ses systèmes d’endiguement.

### **Abstract**

Located on the coast of the French department of Calvados, the community of municipality Coeur Côte Fleurie (4CF) is made up of 11 municipality. Among the cities of the 4CF, the most important are Deauville, Trouville-sur-Mer, Touques and Villers-sur-Mer. 4CF population is about 20,000 inhabitants around the year and it can reach 120,000 inhabitants during the summer.

Prior to assume the GEMAPI competency on January 1<sup>th</sup>, 2018, 4CF commissioned the SCE company to carry out an inventory of the existing levee systems and their management framework on its territory, and to analyze different scenarios of possible governance to exert this competency.

Regarding marine flooding, 4CF decided to exert its own defense mission against the sea. Following the preconfiguration studies, 4CF selected two levee systems in Villers-sur-Mer and Blonville-sur-Mer protecting respectively more than 3,000 people and about 2,200 people. The levee system specificity lies on the fact that they are made of road embankment under the property and management of the departmental council of Calvados (CD14). The road embankment was never classified as flood protection, it constitutes a levee by use. As required by the French law MAPTAM, a convention to allow shared usage, free of charge, was established between the 4CF and the CD14 to organize the management coordination, and the reciprocal responsibilities and obligations of each party according to their respective use.

This communication presents: 1) the situation of the 4CF, the legal framework of the GEMAPI competency; 2) the characteristics of the levee systems on the 4CF territory; 3) the chosen governance scenario for the levee systems’ management; 4) and the practical details for the shared usage of the multipurpose road embankment under the established convention between 4CF and CD14. Therefore, this communication enables to assess the measures and exchanges engaged by the 4CF to establish the levee systems.

# **Modes de gestion et responsabilités des ouvrages de lutte contre l'érosion et la submersion marine en Occitanie**

## ***Management and liabilities in the Occitanie Region of hard structures against erosion and marine submersion risk***

**D. Boulet<sup>1</sup>, M.E. Giunta Fornasin<sup>2</sup>, H. Heurtefeux<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Delphine BOULET, EID Méditerranée, Montpellier, [dboulet@eid-med.org](mailto:dboulet@eid-med.org)

<sup>2</sup>Maria Eugenia GIUNTA FORNASIN, EID Méditerranée, Montpellier,  
[megiuntafornasin@eid-med.org](mailto:megiuntafornasin@eid-med.org)

<sup>3</sup>Hugues HEURTEFEUX, EID Méditerranée, Montpellier,  
[hheurtefeux@eid-med.org](mailto:hheurtefeux@eid-med.org)

### **Résumé**

Le littoral de la Région Occitanie, constitué principalement de côtes basses sableuses, est fortement exposé aux risques d'érosion et de submersion marine. Depuis les années 1940, de nombreux ouvrages en enrochements ou en blocs de béton, appelés aussi « ouvrages en dur » ou « digues » par les néophytes, ont été édifiés sur le Domaine Public Maritime (DPM).

Actuellement les limites fonctionnelles de ce type d'ouvrage ont largement été démontrées : aggravation de l'érosion en aval de la dérive, surcreusement aux abords de certains ouvrages, perturbation des transports naturels de sables, etc. Les constructions faiblissent ainsi en quantité depuis les années 1990.

Pour autant leur implantation faisait et fait encore à l'heure actuelle l'objet de conventions dont les conditions d'application et les acteurs varient d'un ouvrage à l'autre. Les ouvrages d'Occitanie sont majoritairement concédés par le biais de concessions d'utilisation du DPM en dehors des ports. Ce type de titre est soumis à une démarche précise contenant une instruction administrative par le service gestionnaire et une enquête publique. La durée maximale de ce type titre ne peut excéder 30 ans. Certains ouvrages du littoral se retrouvent donc dans une situation juridique difficile car les titres d'occupation sont arrivés à échéance. C'est le cas de 22 % des ouvrages littoraux régionaux.

La pérennité de ces ouvrages se pose d'autant plus que depuis le Grenelle de la mer, de nouvelles stratégies apparaissent : modes de gestion plus « doux » (rechargements de plage, reconstitution de cordons dunaires), mise en place de

mesures de réduction de la vulnérabilité ou encore lancement d'opérations de relocalisation des activités et des biens, désormais appelées recomposition spatiale des territoires littoraux.

Pour finir, la détermination des responsabilités en cas de dommages, la nomenclature accordée à ces ouvrages et la multiplicité des acteurs concernés : particuliers, collectivités locales et services de l'État, sont autant d'autres problématiques que cet article vise à éclaircir. Un cadre de gestion plus clair doit être mis en place rapidement d'autant plus que la compétence GEMAPI mise en place depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2018 intègre les opérations de gestion intégrée du trait de côte contribuant à la défense contre la mer.

Cet article permet donc, à travers un travail d'entretiens et d'analyse des titres d'occupation mené en 2017, de mettre en évidence les spécificités départementales en termes d'implantation et de gestion des ouvrages. Une analyse des différents types de titres d'occupation et des responsabilités occasionnées est également proposée.

### **Abstract**

The shoreline of the Occitanie Region, principally formed by sandy beaches, is strongly exposed to the risk of erosion and marine submersion. Since 1940, many hard structures and dikes have been built on the Maritime Public Domain (MPD). This kind of constructions has been declining in quantity since the 1990s, after its functional limits have been widely demonstrated.

However, their implementation was and is still the subject of conventions whose conditions of application and actors vary from one structure to another.

The durability of these structures also arises especially since the "Grenelle de la Mer" when new strategies appear: softer management (beach nourishment, dune rehabilitation), implementation of reduction measure vulnerability or launching operations relocating activities and goods.

Finally, the determination of liabilities by damage, the nomenclature granted to these structures and the multiplicity of actors concerned: individuals, local authorities and government services, are also issues that this article aims to lighten.

This article highlights the specific implementation and management of structures in the four administrative areas of the Occitanie Region, through interviews conducted in 2017. An analysis of the different types of occupation titles and the responsibilities involved is also proposed.



# **SIRS Dignes V2 : Le logiciel métier coopératif pour les professionnels de la gestion des digues (et cours d'eau)**

## ***SIRS Dignes V2: The cooperative business software for dike management professionals (and watercourse)***

**J. Perrin<sup>1</sup>, V. Platz<sup>2</sup>, A. Castagnet<sup>3</sup>, S. Patouillard<sup>4</sup>, R. Tourment<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Association France Dignes, Grenoble, [jordan.perrin@france-dignes.fr](mailto:jordan.perrin@france-dignes.fr)

<sup>2</sup> Association Départementale Isère Drac Romanche, Grenoble, [v.platz@adisere.fr](mailto:v.platz@adisere.fr)

<sup>3</sup> Syndicat interrégional d'Aménagement des digues du Delta du Rhône et de la Mer,  
Arles, [antoine.castagnet@symadrem.fr](mailto:antoine.castagnet@symadrem.fr)

<sup>4</sup> DREAL Centre Val de Loire, Orléans,

[sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr](mailto:sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr)

<sup>5</sup> IRSTEA, Aix en Provence, [remy.tourment@irstea.fr](mailto:remy.tourment@irstea.fr)

### **Résumé**

Au début des années 2000 l'Association Départementale Isère Drac Romanche (ADIDR) et le Syndicat interrégional d'Aménagement des digues du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM) se sont joints à un projet du Cemagref (IRSTEA aujourd'hui) de création d'un outil à base de SIG dédié à la gestion des digues qui répondrait aux principales missions quotidiennes du gestionnaire (surveillance, programmation et suivi des travaux, obligations réglementaires ...) collaboration qui aboutit en 2004 par la mise en service d'un logiciel opérationnel le SIRS Dignes.

Le Système d'Information à Références Spatiales (SIRS) digues permet d'assurer la conservation, la capitalisation et surtout la pérennisation de la mémoire des données relatives à ces ouvrages (entretiens, surveillance, travaux etc.). Par une structuration et un type de stockage moderne il permet en outre d'exploiter les informations enregistrées, de réaliser un suivi diachronique des faits, de mettre en forme et de réaliser des rapports à partir de l'ensemble des données présentes, etc.

Un SIRS Dignes 2e génération a été élaboré et est actuellement diffusé auprès des gestionnaires (une dizaine de structures actuellement, représentant un linéaire de digues de près de 1 000 km) il est disponible depuis juin 2017. Il propose une nouvelle ergonomie, une indépendance vis-à-vis de logiciel tiers (version totalement open-source, licence GPL 3.0), multi-utilisateurs (administration des rôles), connexion à une base distante, architecture modulaire, application mobile (pour les relevés de terrains) etc.

Afin d'assurer l'épanouissement, la pérennité du logiciel, l'association France Dignes assure désormais le suivi et la maintenance de cet outil métier. Mutualisation des moyens, synthèse des demandes et besoins, formations... les rôles de l'association sont nombreux et divers.

Enfin, le SIRS Dignes est dans sa nouvelle version modulable et évolutif ce qui lui permet d'envisager des partenariats divers pour son développement. Un travail avec des groupements tels que DIDRO pour, à terme, disposer d'un lien direct avec le logiciel ou encore des laboratoires comme Irstea qui travaille depuis de nombreuses années à une méthode d'évaluation de la performance des digues à base d'indicateurs, sur la base de plusieurs projets de recherches réussis. Cette méthode, mixant avis d'expert formalisés et modélisations numériques disponibles, utilise potentiellement toutes les données de tous types disponibles sur les ouvrages et leur environnement. Le SIRS est à même de fournir les données pour alimenter la méthode, il est donc envisagé le développement d'un module d'aide au diagnostic des digues basé sur cette méthode ; c'est d'ailleurs ce qui était envisagé dès l'origine des deux concepts. Le logiciel pourrait aussi être couplé, en partie, avec l'outil CARDIGUES développé par le Cerema.

### **Abstract**

Data collection and management are now essential. It is essential to be able to manage order and sustain the information. In the age of Big Data, the concatenation and reliability of knowledge greatly improves the overall expertise. By means of an ever more relevant and specialized technology, data is now transformed into hypotheses, into facts that make it possible to understand and even anticipate various phenomena and activities.

There are nearly 9 000 km of dikes in France. These constructions are, for the most part, very old, and the knowledge of their characteristics remains incomplete. Thus, the collection and management of data relating to dikes is a real challenge for their managers. A need for restitution of this data collected and archived is also omnipresent. The data must be accessible quickly in order to carry out swift and relevant diagnostics, with the aim of a day-to-day, adapted intervention, but above all to benefit from an operational responsiveness to the risk of flooding.

The SIRS dikes tool has been developed by and for managers in this sense. It is free software dedicated to the management of dikes and rivers, linking database, database and interactive cartography.

It follows a first version that became obsolete and was used by a small number of managers who wanted to share this tool.

# **Prise en compte de l'incertitude dans la réglementation relative aux digues Retour d'expérience sur le bassin versant de l'Arve (Haute-Savoie)**

## ***Uncertainty management in dike regulation Feedback on the Arve watershed***

**F. Charles<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents  
Saint Pierre en Faucigny, [fcharles@sm3a.com](mailto:fcharles@sm3a.com)

### **Résumé**

Depuis 2012, le SM3A est EPTB sur le bassin versant de l'Arve, d'une surface de plus de 2000 km<sup>2</sup>, territoire sur lequel vivent près de 350 000 habitants permanents répartis sur 106 communes, et qui reçoit autant de touristes chaque année. Le SM3A est depuis le 01/01/2017 la collectivité qui exerce la compétence GEMAPI pour le compte des 13 EPCI membres, sur le bassin de l'Arve en Haute-Savoie. Il est à ce titre gestionnaire d'un parc d'ouvrages de protection contre les crues des cours d'eau, dont il ignore encore si l'inventaire est complet. Il ignore également très souvent les caractéristiques techniques des ouvrages ou les phénomènes de référence ayant servi au dimensionnement.

De surcroît, une bonne moitié de ces ouvrages se situent sur des cours d'eau à crue rapide, voire torrentielle. Ces crues, imprévisibles, de courte durée, possèdent une très forte énergie, liée à la pente, qui leur confère une grande capacité d'érosion, une grande capacité de transport de sédiments, une forte variabilité des formes d'écoulement possibles, et une forte variabilité du tracé ou de la géométrie du lit. Pourtant, la réglementation appliquée à ces ouvrages, notamment celle qui encadre la rédaction des études de danger (EDD), est la même que celle appliquée aux digues fluviales ou maritimes.

Le SM3A se trouve confronté à deux types de difficultés : celles liées à la complexité administrative née de la réglementation relative aux systèmes d'endiguement, et qui conduit dans le cas d'un système d'endiguement présent sur le bassin versant à une durée d'au moins 5 ans entre le démarrage de l'EDD et l'obtention de l'arrêté préfectoral permettant la régularisation, et celles d'ordre technique, lorsqu'il s'agit de transcrire les principes de ladite réglementation au cas des cours d'eau de régime torrentiel, dont l'hydrologie est très difficile à déterminer,

le comportement en crue presque impossible à complètement modéliser, et tout autant difficile à anticiper.

Alors même que l'État envisage de faire exister une exception « torrentielle » dans la réglementation relative aux PPRN, il serait nécessaire d'en faire de même dans la réglementation relative aux digues, afin de permettre à leurs gestionnaires de mener des études utiles, orientées sur les problématiques qui leur sont propres, et de bénéficier de la même protection juridique que les gestionnaires de digues fluviales ou maritimes.

### **Abstract**

Since the beginning of the year 2017, according to the law, SM3A is in charge of managing aquatic environments and flood prevention, at the scale of the Arve watershed, running from the Chamonix summits down to Annemasse, on the french-swiss border.

SM3A has now to fulfil several duties, among which is management of dikes, including regularization of their administrative situation. Half of the dikes are located on torrents, in which flows are violent and suddenly raised. Though, the exact number of dikes, and their structural composition, are not exactly known, The regulation on dikes fits well with the case of biggest french rivers. Hydrology, hydraulics parameters, and dikes failure scenarios are completely different from the case of torrents.

Therefore, it is almost impossible to correctly fulfil the regulatory requirements, mainly because of the difficulty to take uncertainty into account.

# **Compétence GEMAPI**

## **Application à une digue de protection contre les inondations du fleuve Var**

### ***GEMAPI jurisdiction – Implementation to a dike of protection against the floods of the river Var***

**P. Richert<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> TRACTEBEL, Nice, [pascale.richert@tractebel.engie.com](mailto:pascale.richert@tractebel.engie.com)

#### **Résumé**

La digue de Cap 3000 est située sur la commune de Saint Laurent-du-Var, en rive droite de l'embouchure du fleuve Var sur la mer Méditerranée. C'est un ouvrage en remblai globalement homogène de section trapézoïdale, long de 490 m, protégé à la surverse par une carapace de béton et d'encrochements qui protège une zone globalement triangulaire limitée par les talus de la voie ferrée et l'autoroute A8 au Nord-Ouest, et la mer au Sud-Ouest.

Il nous a paru intéressant de communiquer sur l'application de la compétence de Gestion des Milieux Aquatiques et la Prévention des Inondations (GEMAPI) à cet ouvrage de protection dont le gestionnaire actuel est une société de droit privé dans un secteur urbanisé où le Département des Alpes Maritimes a engagé depuis plusieurs années une politique globale de prévention des inondations.

#### **L'endiguement de la Basse vallée du Var**

Le Var est un fleuve côtier long de plus de 114 kilomètres qui présente un régime hydrologique complexe : de type plutôt nival en amont et de type méditerranéen pluvial sur son cours inférieur. Dans sa basse vallée, le Var présentait naturellement un lit à tressage vif. La largeur de divagation du Var était d'environ 500 m.

Des travaux d'endiguement se généralisent entre 1955 et 1964. La surface dévolue à la rivière diminue de près de 60 %. La concentration des écoulements en crue a augmenté la capacité de charriage et entraîné un exhaussement du lit aval.

La basse vallée s'urbanise fortement, le lit du fleuve, surexploité s'abaisse fortement. Des seuils sont alors réalisés, pour maintenir artificiellement la ligne d'eau d'étiage, qui ont redonné une pente globale au lit, mais entraîné la constitution d'une morphologie de type fluvial, avec la création de souilles emplies de limon à écoulement presque nul.

Suite aux inondations catastrophiques de 1994, la basse vallée du Var a fait l'objet d'une étude de réaménagement visant à revenir au fonctionnement naturel du fleuve. Le Préfet des Alpes Maritimes a approuvé le 18 avril 2011 un PPRI classant les

zones inondables. Ce PPRI définit un niveau global pour une crue centennale de référence et des critères de « digue résistante » issus de la Doctrine « Rhône ». Deux plans successifs d'aménagement (PAPI) de la basse vallée du Var entre 2009 et 2019 ont été mis en place, pour notamment conforter les ouvrages de protection au niveau de la crue centennale. Ces ouvrages sont situés sur les communes appartenant à la Métropole Nice Côte d'Azur, qui participe à leur réaménagement aux côtés du Département.

Construite entre 1864 et 1865 pour assécher une zone à vocation maraîchère, la digue fut reconstruite en 1941 dans sa forme actuelle lors des grands travaux d'endiguement. En 1970, le plus grand centre commercial d'Europe, de Cap 3000 est construit à l'arrière de l'ouvrage de protection non entretenu qui s'est progressivement végétalisé.

## **Abstract**

The dike of CAP 3000 is situated on the municipality of Saint-Laurent-du-Var, in right bank of the mouth of the Var river on the Mediterranean Sea. It is a globally homogeneous backfill embankment of trapezoid section, length of 490 m, protected from overflow by a concrete armor and ripraps.

It seemed to us interesting to communicate on the implementation of the law of Management of the Aquatic Circles and the Flood control (GEMAPI) with this dike of protection against flood, the current administrator of which is a company of private law, in an urbanized sector, where the Department of the Alpes-Maritimes committed for several years an overall policy of flood control.

A first part describes the history of the dike, the context of confinement of the Var Low Valley and the implementation of a plan of flood control.

The second part describes the dike of CAP 3000 and the organization of its supervision before implementation of the new regulations.

The third part details the new statutory context of the dike within the framework of the GEMAPI and of the decree Dikes 2015, and presents the future flood protection device, its organization and the actions to be led.

The last part and the conclusion raises the stakes, the perspectives, the difficulties, for the various actors of the project, the transfer of the dike into a global flood protection device a under control of the future organization GEMAPI.

# Une communauté internationale sur les digues

## *An international Community of Practice on Levees*

**R. Tourment<sup>1</sup>, E. Sossenkina<sup>2</sup>, M. Bottema<sup>3</sup>, P. Peeters<sup>4</sup>, R. Pohl<sup>5</sup>,  
A. Rushworth<sup>6</sup>, J. Simm<sup>7</sup>, M. Van<sup>8</sup>**

<sup>1</sup> Irstea, Aix en Provence, [remy.tourment@irstea.fr](mailto:remy.tourment@irstea.fr)

<sup>2</sup> HDR Inc., Denver (CO, USA), [elena.sossenkina@hdrinc.com](mailto:elena.sossenkina@hdrinc.com)

<sup>3</sup> Rijkswaterstaat, Lelystad (Pays Bas), [marcel.bottema@rws.nl](mailto:marcel.bottema@rws.nl)

<sup>4</sup> Flanders Authority, Departement of Mobility and Public Works, Anvers (Belgique),  
[patrik.peeters@mow.vlaanderen.be](mailto:patrik.peeters@mow.vlaanderen.be)

<sup>5</sup> TU Dresden, Dresde (Allemagne), [reinhard.pohl@tu-dresden.de](mailto:reinhard.pohl@tu-dresden.de)

<sup>6</sup> Environment Agency, Exeter (Royaume Uni),

[adrian.rushworth@environment-agency.gov.uk](mailto:adrian.rushworth@environment-agency.gov.uk)

<sup>7</sup> HR Wallingford, Wallingford (Royaume Uni), [j.simm@hrwallingford.com](mailto:j.simm@hrwallingford.com)

<sup>8</sup> Deltares, Delft (Pays Bas), [Meindert.van@deltares.nl](mailto:Meindert.van@deltares.nl)

### Résumé

La gestion du risque d'inondations (FRM) est basée sur une série de mesures et d'instruments possibles comprenant, de manière non exhaustive, les ouvrages de protection. Pour arriver à une complémentarité et une cohérence entre ceux-ci, il y a nécessité de collaboration et d'échanges d'informations entre les différents gestionnaires et décideurs aux différentes échelles et les ingénieurs et scientifiques, généralistes ou spécialistes de différentes disciplines. La prise de conscience des avantages d'une vaste communauté internationale de pratique (CoP) sur la gestion des risques d'inondation, ainsi que des CoP plus spécialisées (digue et barrages, géotechnique, hydrologie, hydraulique, services de secours...) a augmenté ces dernières années. En Europe, de nombreux projets de recherche liés aux risques d'inondation impliquant des équipes internationales, ainsi que la série de conférences FLOODrisk (2008, 2012, 2016) incarnent l'initiation de cette FRM-CoP.

En ce qui concerne les digues et autres ouvrages de protection contre les inondations, une communauté internationale de décideurs, de praticiens et de gestionnaires a commencé à se développer ; l'International Levee Handbook (ILH, CIRIA, 2013), rédigé par une équipe internationale, a démontré à la fois le besoin et la faisabilité d'une telle collaboration. L'ingénierie et l'analyse des barrages et celles des digues ont beaucoup en commun en termes de sciences fondamentales, tandis que les spécialistes de chaque type de structure peuvent apprendre beaucoup des

spécialistes des autres disciplines ; en outre, de nombreux ingénieurs et gestionnaires travaillent déjà sur les deux types de structures. De nombreux comités nationaux de la CIGB ont intégré les digues dans leur champ d'application, et le Club européen de la CIGB a approuvé, lors de sa réunion du congrès CIGB de Stavanger en 2015, la création d'un groupe de travail sur les digues et ouvrages de protection contre les inondations. Ce groupe de travail prolonge la collaboration initiée pendant l'ILH et élargit le nombre de pays associés *via* le réseau de la CIGB. Le congrès CIGB de Vienne en 2018 a comporté une Question sur les digues et petits barrages, pour la première fois dans son histoire, ce qui concrétise la reconnaissance de l'intégration des questions relatives aux digues au sein de cette communauté des barrages.

L'article présente le développement et les résultats de ces initiatives internationales. Il comprend une présentation de l'avancée des travaux du groupe de travail du Club Européen de la CIGB ainsi qu'une analyse et une synthèse des articles relatifs aux digues et aux ouvrages de protection contre les inondations qui ont été publiés et présentés lors du congrès CIGB de Vienne (Autriche, juillet 2018). Cela comprend, mais sans s'y limiter : les méthodes d'investigation et de diagnostic, les brèches, les approches liées à l'analyse et à la gestion des risques.

### **Abstract**

The paper presents the development and results of several international initiatives on the creation of a community of practice around flood protection levees and the link with a broader flood risk management community (FRM-CoP).

After a brief presentation of the FRM-CoP concept and an history of this cooperation, it includes a brief analysis and synthesis of the articles and activities relating to levees and flood protection structures that were published and presented during the international conference FLOODrisk2016 in Lyon (France, October 2016), the last of an ongoing series, the next one being planned in 2020 in Budapest.

Finally, the paper presents the link of the levee community with the International Committee on Large Dams (ICOLD). This includes a presentation of the progress of the work of the Working Group on Levees and Flood Defences (LFD WG) of the European Club of ICOLD since its creation in 2015, the objectives of the new ICOLD Technical Committee on Levees (LE TC) and the prospects of sustaining this community in the long term. The ICOLD congress in Vienna (Austria, July 2018) was an important date for levees in ICOLD. It included a Question on levees, meetings of the LFD WG and LE TC, and a workshop on levees, details on these activities are presented in the paper.



# Diffuser les connaissances sur les digues : deux exemples d'outil

## *Knowledge dissemination about levees: two examples of tool*

C. Curt<sup>1</sup>, H. Félix<sup>1</sup>, P Di Maiolo<sup>1</sup>, R. Tourment<sup>1</sup>, J. Perrin<sup>2</sup>,  
P. Broust<sup>2</sup>, S. Mortier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irstea, Aix-en-Provence, [corinne.curt@irstea.fr](mailto:corinne.curt@irstea.fr)

<sup>2</sup> France Dignes, Grenoble, [jordan.perrin@france-dignes.fr](mailto:jordan.perrin@france-dignes.fr)

### Résumé

Les connaissances sur la vie des ouvrages hydrauliques, de leur conception à leur démantèlement ou abandon – en passant par leur réalisation, leurs modes de rupture et dégradation, les méthodologies de reconnaissance et de diagnostic, la réglementation associée, etc. – sont nombreuses mais dispersées. Une partie de ces connaissances est tacite. Elles présentent, en outre, différents formats : textes, formules, photographies, vidéos. De nouvelles connaissances sont créées au fil du temps. Il est donc intéressant de proposer des outils aptes à rassembler, capitaliser, expliciter et diffuser les connaissances actuelles et futures. Dans cet article sont présentées deux expériences visant à diffuser la connaissance sur les digues.

Il s'agit d'une part, de l'outil WikiBarDig (<http://wikibardig.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Portail:Wikibardig>), développé par Irstea et hébergé sur le site du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire depuis août 2015. Cette base de connaissance a pour objectif de capitaliser et diffuser les savoirs sur les ouvrages hydrauliques (barrages et digues). Il s'adresse à des publics pouvant être variés : étudiants, enseignants, ingénieurs du domaine (services de contrôle de l'État, bureaux d'études, collectivités territoriales), gestionnaires et propriétaires d'ouvrages, établissements de recherche et d'enseignement. La page d'accueil permet d'accéder à la plateforme au travers de 3 modes d'interrogation : recherche par mot-clé, recherche selon les rubriques Wikis MTES ou visite guidée. Grâce aux visites guidées, l'utilisateur peut soit explorer de manière très approfondie un thème (par exemple les systèmes de protection contre les inondations) ou alors explorer l'ensemble des thèmes de manière plus générale pour avoir une idée d'ensemble sur les différentes thématiques liées aux digues. La base contient au 09/10/2018 environ 150 pages pour les deux types d'ouvrages hydrauliques, sachant qu'un certain nombre d'entre elles sont communes aux deux types d'ouvrage (description par exemple des phénomènes de dégradation comme l'érosion interne...). Des statistiques de fréquentation sont disponibles aux administrateurs et gestionnaire. Les visiteurs sont majoritairement français, d'autant que les pages sont rédigées en français mais environ 20 % des consultations sont faites depuis l'étranger également.

D'autre part, il s'agit des journées techniques organisées par France Dignes, association nationale des gestionnaires de digues, visant à structurer la profession de gestionnaire de digues et à être un lieu d'échanges techniques et de formation pour renforcer les compétences. Les journées techniques fournissent des lieux d'échanges, de débats et de rencontres des professionnels de la gestion des digues. Elles ont pour objectifs l'amélioration des pratiques et la structuration de cette filière professionnelle. Elles participent à renforcer les compétences métiers des gestionnaires de digues en proposant des contenus riches présentés par les différents membres de l'association et/ou acteurs de la gestion des digues. Les journées techniques se déroulent généralement sur deux jours. La première journée est en salle et la seconde sur le terrain. Ce choix permet, dans l'extrême majorité des cas, d'explicitier une première journée très théorique par des exemples concrets d'application ou de mise en œuvre. À ce jour, 14 journées ont été organisées.

Ces 2 outils complémentaires trouvent actuellement une résonance particulière avec l'instauration de la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations) depuis le 01/01/2018, notamment pour le volet concernant la défense contre les inondations et contre la mer. Ils peuvent en effet constituer une aide auprès des collectivités ou des bureaux d'études en appui pour la mise en œuvre de cette nouvelle compétence.

### **Abstract**

Much is known about levee from their design towards their decommissioning – including their construction, failure and degradation modes, diagnosis approaches, regulation of concern, tec. – though the information is scattered and sometimes lacks clarity. Some of the knowledge is not explicit but tacit. Knowledge exists in different formats such as texts, photographs and videos. New knowledge is generated over time. Consequently, it is interesting to develop tools that allow gathering, capitalizing, making explicit, disseminating current and future information. In this article, two tools aiming at disseminating knowledge on levees are presented. On the one hand, the article presents WikiBarDig (<http://wikibardig.developpement-durable.gouv.fr/index.php/> Portail:Wikibardig), developed by Irstea and held by the French Ministry of Ecology (ministère de la Transition Ecologique et Solidaire). This knowledge base aims at capitalizing and disseminating knowledge on hydraulic works (dams and levees). It is susceptible to interest a wide section of the public including students, teachers, and debutant and experienced engineers in the domain working for different organisations such as government inspection services, engineering offices, regional authorities, entities managing and owning structures. On the other hand, the article presents technical sessions managed by France Dignes Association. These sessions provide forums for discussion, debate and meetings for levee managers. These two complementary tools currently present a specific interest due to the introduction of the GEMAPI (Aquatic Environment Management and Flood Prevention) competency since 2018/01/01, particularly for the section concerning protection against flood and sea. Indeed, these tools can support the communities or engineering during the implementation of this new competence.

# Thème 2

## Ouvrages et systèmes de protection et stratégies de gestion des risques d'inondation

### Comité scientifique

#### *Animateurs de la session orale :*

Yann Deniaud	Cerema
Thierry Monier	Artelia

#### *Relecteurs :*

Yann Deniaud ( <i>Coordinateur</i> )	Cerema
Loïc Le Louargant	CD 76
Thierry Monier	Artelia
Sébastien Patouillard	DREAL Centre
Clément Rataud	Communauté de Communes de l'Île de Noirmoutier
Laetitia Rivollet	BETCGB (MTES / DGPR)



# Mitigation des inondations causées par les rivières de plaine en zones urbaines : méthodes et exemples de solutions

## *Measures to counter floods in urban areas along low land rivers: methods and examples*

R. Slomp<sup>1</sup>, L. Deroo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Rijkswaterstaat, Pays Bas, [Robert.slomp@rws.nl](mailto:Robert.slomp@rws.nl)

<sup>2</sup> ISL Ingénierie, Lyon, [deroo@isl.fr](mailto:deroo@isl.fr)

### Résumé

Cet article tire parti d'approches notamment françaises et néerlandaises sur le sujet des inondations causées par les rivières de plaine, en zone urbaine.

Les rivières de plaine ont des crues lentes, sont influencées par le niveau de la mer sur des dizaines ou centaines de km de leur embouchure, ont un débit de pointe modéré mais qui, cumulé sur plusieurs jours, correspond à un grand volume. Les enjeux économiques dans les zones urbaines sont importants ou très importants en cas d'inondation ; l'enjeu humain est souvent fort en cas de rupture des digues.

Trois thèmes sont développés.

Méthodes de l'analyse Coûts-Bénéfices : nous examinons comment sont évalués les coûts et bénéfices : bénéfices économiques de la protection, évaluation et appréciation du risque humain

Retour d'expérience des solutions : nous présentons de manière comparée les démarches adoptées dans nos pays respectifs, avec par exemple :

- L'aménagement du bassin de la Seine (depuis 1910) : entre mesures d'amélioration de l'hydraulicité, protections locales et gestion globale à l'échelle du bassin notamment avec les barrages réservoirs.
- Le plan Delta aux Pays Bas (1953-1985) qui a montré la nécessité de beaucoup investir pour les zones à risques, urbaines et rurales, en renforçant les ouvrages existants et en construisant des ouvrages nouveaux.
- Le plan français submersions rapides (2011-2016) et son focus sur la prévision et la réduction de la vulnérabilité.
- Le projet Room for Rivers 2001-2015, qui a montré que renforcer les ouvrages n'est pas la seule solution. Après 200 ans de réduction du lit majeur, il fallait trouver des solutions avec la population pour réduire les obstacles à l'écoulement.

Pistes pour l'avenir : les solutions nouvelles (résistance à l'érosion, pompage de

grande capacité, ...), les moyens nouveaux de prévision, inspection en crue et communication, les approches nouvelles (services écosystémiques, ACB) sont de nature à faire évoluer nos méthodes. Nous tentons de combiner retours d'expérience et nouveautés pour suggérer et quantifier des types de protections adaptés. Dans la mesure du possible, nous illustrons le propos avec le cas de la Seine.

## Abstract

This article covers flood risk and floods along the lower reaches of rivers and in urban areas. These rivers are often characterized by floods which last weeks, not very high peak flows, but because of the duration it involves large volumes of water and the influence of sea in the estuaries (tides, storm surges) can be observed from ten kilometers from the sea up to a hundred. Potential economic losses due to floods in the urban areas can be huge or devastating.

We will cover three themes:

Cost Benefit Analysis: We will cover how costs (flood damages and reinforcement costs) and benefits (avoided or reduced damages) are estimated, the cost of a human life, and monetizing costs and benefits for ecosystems

A comparison of measures to cope with flood risk: We will cover the policy issues and the implementation, e.g.:

- Since the 1910 floods the Seine catchment has been improved with measures to increase the conveyance capacity, the (re)construction of flood defenses and large reservoirs to reduce peak discharges to the main rivers.
- The Dutch Delta Plan (1953-1985) showed it was necessary to invest in flood protection for both urban and rural areas by reinforcing existing flood defences, by building new flood defenses.
- The French Plan « Le plan submersions rapides (2011-2016) » set up after the storm surge Xynthia and flash floods in the Var region. This plan focused on improving the forecasts and reducing the risk for the population [2].
- The Room for Rivers program (2001-2015) which shows reinforcing flood defenses is not the only solution. After 200 years of building in the flood plain and reducing the size of the flood plain especially at cities hydraulic constraints had to be addressed

Solutions: There are a lot of possible solutions available for coping with floods on rivers, technical solutions (e.g. reducing the erodibility of flood defenses, large pumps in combination with reservoirs to reduce peak flows), improved forecasting, inspection and communication techniques to reduce flood impacts, new solutions. We will cover different types of solutions and add examples from the Seine river.

# Protection contre les inondations du projet de la Technopole de Foum El Oued (Maroc), une évidence ?

## *Is the Flood protection of the Foum El Oued Technopole project (Morocco), self-evident?*

D. Mazel<sup>1</sup>, M. Fernez<sup>2</sup>, C. Meunier<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TRACTEBEL Engineering, NÎMES, [didier.mazel@tractebel.engie.com](mailto:didier.mazel@tractebel.engie.com)

<sup>2</sup> TRACTEBEL Engineering, NÎMES, [marion.fernez@tractebel.engie.com](mailto:marion.fernez@tractebel.engie.com)

<sup>3</sup> TRACTEBEL Engineering, NÎMES, [célia.meunier@tractebel.engie.com](mailto:célia.meunier@tractebel.engie.com)

### Résumé

Le projet de technopole de Foum El Oued s'étend sur 126 ha en bordure de l'océan Atlantique dans l'embouchure asséchée de l'oued Sakia El Hamra. Situé à 18 km en aval de la ville de Laâyoune ce projet urbain vise à être un catalyseur du développement socio-économique, culturel et humain des régions du Sud du Maroc.

Lors des études de projet, les débits de l'Oued ont été jugés négligeables, en raison : de l'obstruction de la basse vallée par les dunes de sable, de la présence du barrage Sakia El Hamra (SH) à Laâyoune et de l'absence de crues ayant atteint l'océan depuis plus de cinquante ans.

Alors que les travaux étaient en cours, la crue du 28 au 30 octobre 2016 a balayé l'ensemble des infrastructures de la basse vallée et le site de la technopole. Lors de cet épisode le débit de l'oued (de 3 200 à 4 100 m<sup>3</sup>/s selon les estimations), près de dix fois supérieur à la capacité de l'évacuateur du barrage SH, a provoqué la rupture du barrage par surverse, suivie par l'effacement total des dunes de la basse vallée.

Suite à cette crue majeure, le maître d'ouvrage a engagé une étude pour réévaluer le risque d'inondation et pour identifier les solutions de protection de la technopole.

Après une révision de l'hydrologie de crue, un modèle hydraulique 2D a été construit pour comparer l'efficacité relative de solutions d'aménagement du delta.

L'efficacité des chenaux de transfert direct des crues à l'océan se heurte à une obstruction récurrente par les dunes éoliennes des couloirs de sable qui prennent naissance au bord de l'océan près de 100 km au Nord. Le remaniement local de ces bouchons de sable par l'oued reste partiel et très occasionnel selon l'importance des débits et leur capacité à franchir les séries de dunes.

Aussi, la solution retenue pour la protection de la technopole se résume d'une part à l'isolement complet du projet urbain par une digue longue d'environ 2 000 m prolongée jusqu'à la plage littorale et d'autre part à la nécessaire préservation de la totalité de l'espace deltaïque d'étalement et de divagation des eaux.

La mise en œuvre du projet de protection induit cependant des dispositions

d'accompagnement imprévues et contraignantes telles que :

- L'acquisition de nouvelles parcelles pour l'implantation de la digue,
- L'obtention des autorisations administratives,
- Le rétablissement des circulations périphériques,
- Des adaptations du projet de la technopole,
- Un décalage important et peu maîtrisé du calendrier de réalisation,
- L'absence de maîtrise pour réglementer la préservation de l'ensemble de la zone inondable du delta (environ 30 km<sup>2</sup>).

Enfin, les enjeux d'une ville nouvelle fréquentée par plusieurs milliers de personnes, obligent à la mise en place d'une structure et de moyens permanents de suivi et d'entretien des ouvrages de protection, dans un territoire où la culture du risque d'inondation est quasiment inexistante.

Malgré la simplicité technique du projet de protection, les difficultés de sa mise en œuvre et le défi de son maintien permanent ont conduit raisonnablement le maître d'ouvrage à délocaliser la majeure partie du projet de la technopole située dans la zone inondable du delta.

## **Abstract**

The Fom-El-Oued technopole project extends over 126 ha on the edge of the Atlantic Ocean in the dry mouth of the Sakia-El-Hamra Oued. Located 18 km downstream from Laâyoune, this urban project would be a catalyst for development of the South Moroccan regions.

The hazard of flooding has been considered negligible for the project, given there has been no flood reaching the ocean for more than fifty years, due to the weakness of floods, the blocking effect of sand dunes and the storage volume available at the Sakia El Hamra Dam in Laâyoune.

The flood from October 28-30, 2016 that swept away the whole infrastructure in the valley and the works in progress on the site, has brutally brought the long-term risks awareness into focus. This episode caused the breaking of the dam, followed by the total erasure of the dunes in the lower valley.

A 2D hydraulic model has been developed to compare the effectiveness of possible actions. However, the definition of a sustainable scenario still faces the dynamics of the morphological evolution of the lower valley controlled by the movement of the aeolian sand dunes and by the temporary flow of the oued.

The technical solution then boils down to the complete isolation of the urban project by a flood bank and the necessary preservation of the whole flood expansion areas of the delta. This choice requires a permanent maintenance of the dike, while preserving the preferential water paths to the ocean. In the early stages of this ambitious urban project, with the challenge of its permanent protection and considering the low risk-culture of the population, the search for alternatives to relocate the project remains a sensible choice.



# **Le système d'endiguement de Sartrouville et Montesson**

## **Un projet conciliant prévention des inondations, gestion des milieux aquatiques et intégration urbaine**

### *Sartrouville and Montesson's levee system A project reconciling flood risk management, aquatic ecosystems management in an urban site*

**D. Calvar<sup>1</sup>, R. Croix<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> SMSO, Versailles, [dcalvar.smso@gmail.com](mailto:dcalvar.smso@gmail.com)

<sup>2</sup> Egis, Guyancourt, [remy.croix@egis.fr](mailto:remy.croix@egis.fr)

#### **Résumé**

Les quartiers riverains de la Seine de Sartrouville et Montesson ont été inondés par trois fois depuis 20 ans. En cas de crue centennale, 2700 habitants, une dizaine d'activités et une dizaine d'ERP sont inondés. Les dommages pour cette crue sont estimés à 17M€. Les crues de juin 2016 et janvier 2018 ont rappelé cette vulnérabilité.



Photo 1 - Montesson Quartier Laborde - crue de janvier 2018

Le projet de protection de ces populations a été initié en 2003 avec un programme fonctionnel proposant la réalisation d'un système d'endiguement d'une longueur d'environ 3,7 km comprenant :

- la réfection de la digue de Sartrouville haute de 1 à 2 m sur 2,5 km,
- la création d'une digue de fermeture en aval sur 300 m,
- le prolongement de la digue de Sartrouville sur Montesson sur environ 700 m,
- la création d'une digue de fermeture en amont sur 300 m.

Porté par le Syndicat Mixte d'aménagement d'entretien des berges de la Seine et de l'Oise maître d'ouvrage de l'opération depuis 2008 et Egis Maître d'œuvre de l'opération, le projet du système d'endiguement, a été initialement élaboré pour atteindre ces objectifs de protection de la population contre les crues. Il a été

progressivement enrichi et révisé pour intégrer de multiples améliorations et nouvelles fonctions.

La consolidation de la digue existante sur 2,5 km tout comme la construction de la digue neuve sur 700 m ont été pensées et conçues pour concilier les ouvrages techniques nécessaires (rideaux de palplanches) et faciliter l'intégration urbaine, la conservation d'arbres et le développement de cheminement et d'ouvrages récréatifs.

Une valorisation écologique des berges sur 2,5 km a été intégrée au projet de réfection de la digue principale existante en ayant recours au génie écologique malgré les fortes contraintes hydrauliques de courant et de batillage et les impératifs de gestion de la végétation sur un ouvrage classé.

Plusieurs déversoirs hydrauliques finement dimensionnés et insérés tout le long du système d'endiguement en lien avec le fonctionnement hydraulique des zones protégées. Ils assurent une surverse lente et contrôlée en mobilisant une tranche de hauteur correspondant à la revanche de la digue par rapport au niveau atteint en janvier 1955.

Enfin, le projet d'aménagement du bassin de compensation a été enrichi d'un projet complémentaire de création d'une zone humide sur 9 hectares. En lien avec les cofinanceurs du projet, l'obligation de compensation a ainsi été transformée en opportunité de valorisation écologique. La zone dépressionnaire en lien avec la Seine et sa nappe alluviale permet à la fois le stockage des 60 000 m<sup>3</sup> d'eau par tranche de 25 cm et contribue à la diversification des habitats l'accueil des diverses espèces présentes d'amphibiens, insectes, oiseaux, poissons... Elle est complétée d'aménagements paysagers et de préservation de la biodiversité. La zone de dépôt des déblais situé hors zone inondable issu du creusement de cette zone fait aussi l'objet d'un traitement paysager.

La réalisation complète du programme de 17M€ HT de travaux initié en 2002 est prévue pour 2020.

## **Abstract**

The Seine's waterside neighborhoods of Sartrouville and Montesson have undergone a series of three floods since 20 years. In case of a 100-year flood, 2,700 inhabitants, a dozen activities, and a dozen ERP (Public Access Buildings) are flooded. Damages related to this flood are estimated to cost EUR 17M. The floods of June 2016 and January 2018 recalled this vulnerability. The populations protection project was initiated in 2003 with a functional program proposing the refurbishment of the Sartrouville levee, 1 to 2 m high over a 2,5 km length, the creation of a 300 m downstream closing levee and the extension of the Montesson's levee over 700 m for an average total EUR 17M in works. These projects were designed to reach these objectives by reconciling the necessary technical works and the works' integration in their urban territories and adding a hydraulic basin compensating the excavated volumes by the new levee. The project has been revised by the Syndicat Mixte (Joint Association) for the development and maintenance of the Seine and Oise's banks, the project owner since 2008 and Egis, the project manager, by integrating: an environmental rehabilitation of the banks over 2.5 km, 6 hydraulic weirs finely sized and partly inserted on the existing structure. Lastly, the compensation project has been deeply revised to transform it into a wetland, playing the role of the levee's volumetric compensation. The complete implementation of the program that started in 2003 is expected for 2020.

# **Protection de l'agglomération chambérienne contre les crues Travaux de la confluence Leysse-Hyères**

## ***Protection of Chambéry agglomeration against floods Works of the confluence Leysse-Hyères***

**B. Chalus<sup>1</sup>, C. Moiroud<sup>1</sup>, R. Granjon<sup>1</sup>, C. Guay<sup>2</sup>, R. Jalinoux<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> CNR, Lyon, [b.chalus@cnr.tm.fr](mailto:b.chalus@cnr.tm.fr), [c.moiroud@cnr.tm.fr](mailto:c.moiroud@cnr.tm.fr), [r.granjon@cnr.tm.fr](mailto:r.granjon@cnr.tm.fr)

<sup>2</sup> Grand Chambéry, Chambéry, [christophe.guay@grandchambery.fr](mailto:christophe.guay@grandchambery.fr)

<sup>3</sup> CISALB, Chambéry, Lyon, [renaud.jalinoux@cisalb.fr](mailto:renaud.jalinoux@cisalb.fr)

### **Résumé**

Afin de lutter contre les inondations du bassin chambérien (durement touché par la crue de février 1990 notamment), un schéma directeur a été élaboré dans les années 2000 sous le pilotage du SICEC (Syndicat Intercommunal des Cours d'Eau du bassin Chambérien). Celui-ci a ensuite été décliné, étape après étape, la dernière réalisation marquante correspondant aux travaux sur un linéaire de 4,6 km répartis de part et d'autre de la confluence de la Leysse avec l'Hyères. Ces travaux se sont étalés sur un peu plus de 4 années, de 2014 à 2018.

Préalablement aux interventions sur le site, une première phase de l'étude s'est attachée à mener un diagnostic complet des berges, des digues, mais également des abords de la rivière. Celui-ci a permis de mieux cerner les différents problèmes posés et de dégager les enjeux hydrauliques, géotechniques, mais aussi écologiques et paysagers. Ce premier travail a également été l'occasion de mesurer la complexité du projet, au travers de ses interactions avec son environnement direct : équipements publics, entreprises, infrastructures, réseaux...

Outre la réduction de l'aléa hydraulique, par confortement local et/ou reconstruction complète des digues de protection, le projet a répondu à un objectif ambitieux de renaturation environnementale. Contraints par l'environnement urbain à péri-urbain, le niveau de protection fixé (crue de projet de fréquence centennale correspondant à un débit de 370 m<sup>3</sup>/s) a pu être atteint par différents procédés : effacement de seuils et/ou élargissement du lit, voire écrêtement de la pointe de crue par la construction d'une portion de digue déversante, quand le foncier le permettait. La restauration ou la reconstruction des ouvrages de protection ont fait appel à des techniques globalement bien maîtrisées et en parfaite adéquation avec les résultats du diagnostic : noyau étanche, drainage aval, butées de pied, adoucissement des talus et protections calibrées, entre autres.

La mise en œuvre de ces différentes solutions a nécessité à la fois des précautions et des travaux préalables, du fait de l'environnement proche du cours d'eau, très marqué par la main de l'homme : reprise en sous-œuvre, déviations de réseaux secs et humides, raccordement aux ouvrages de franchissement.

L'ensemble de ces travaux de lutte contre les inondations se sont révélés compatibles avec une démarche de développement durable forte. Aussi, cet objectif a été atteint d'une part en intégrant à la fois la problématique des modes de déplacement doux, et en recherchant des solutions d'exécution minimisant les transports ; d'autre part, la conception et la réalisation d'aménagements hydro-écologiques ont permis de recréer une biodiversité du lit mineur du cours d'eau et de ses berges endiguées. L'intégration paysagère des ouvrages sera pleinement atteinte d'ici quelques saisons, tout en déployant une maintenance courante de la végétation. Cette réalisation a été rendue possible grâce à la forte mobilisation de l'ensemble de la chaîne des acteurs, nombreux et de différents horizons, sur ce projet : État, collectivités, associations, entreprises de travaux, concessionnaires et bureaux d'étude.

Les ouvrages ont été éprouvés, avec succès, par différents épisodes de crue le dernier en date remontant à janvier 2018.

### **Abstract**

In order to combat flooding in the Chambéry basin (severely affected by the flood in February 1990 in particular), a master plan was produced in the 2000's under the management of the SICEC. The final stage of works, carried out with Grand Chambéry client, relates to a 4.6 km stretch on either side of the confluence of the Lysse with Hyères. These works took place from 2014 to 2018.

In addition to reducing the flood risk by local reinforcement and / or complete reconstruction of protective dams, the project met an ambitious environmental renaturation objective. Working within the constraints of the urban and periurban environment, the level of protection set was reached by a variety of processes: deepening / widening of the river bed, removal of sills and creation of an overflow dike where the land situation so permitted. The restoration or reconstruction of protective works involved the use of well-managed techniques in line with the results of the diagnosis: impervious core, downstream drainage and gentler slopes for the protection part, and planting, plant / mixed techniques and diversification of the riverbed for the renaturation part.

The ecological integration works will be fully achieved in a few seasons.

This achievement was possible thanks to the great commitment of all those involved: State, local authorities, associations, building contractors, concessionaires and engineering offices.

The works have proved successful over various episodes of flood, such as that of January 2018.

# Étude du devenir des remblais de second rang dans le val d'Authion aval

## *Future of second line levees in the river Authion valley*

O. Barbet<sup>1</sup>, J. Rousselot<sup>2</sup>, V. Gaspari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ISL-Ingénierie, Angers, [barbet@isl.fr](mailto:barbet@isl.fr)

<sup>2</sup> Angers Loire Métropole, Angers, [jean.rousselot@angersloiremetropole.fr](mailto:jean.rousselot@angersloiremetropole.fr)

<sup>3</sup> Établissement Public Loire, Angers, [virginie.gaspari@eptb-loire.fr](mailto:virginie.gaspari@eptb-loire.fr)

### Résumé

#### Introduction

Le val d'Authion est un grand val endigué de la Loire qui s'étend sur les départements d'Indre-et-Loire et du Maine-et-Loire en rive droite du fleuve. Ce val a été endigué depuis le moyen-âge, la superficie soustraite aux inondations de la Loire étant aujourd'hui de plus de 300 km<sup>2</sup>. Sur sa partie aval, le val d'Authion est densément urbanisé. Ce secteur est particulièrement complexe d'un point de vue hydraulique : la zone protégée par la grande levée de Loire est elle-même décomposée en « casiers » hydrauliques par des remblais secondaires. Ce système est traversé par l'Authion canalisé qui draine l'ensemble du val d'Authion et qui en constitue l'unique exutoire sur la commune des Ponts-de-Cé.

Le territoire étudié s'inscrit dans le périmètre du TRI d'Angers. La grande levée du val d'Authion a été classée en classe A au titre du décret n°2007-1735. L'étude de dangers, produite en 2014 par la DREAL Centre, n'aborde pas le cas des remblais secondaires tout en préconisant des études hydrauliques spécifiques pour comprendre leur rôle.

#### Méthode et résultats

Suite aux conclusions de l'étude de dangers et en prévision de la prise de compétence GEMAPI sur son territoire, Angers-Loire-Métropole a souhaité lancer une étude hydraulique de la partie aval du val d'Authion avec pour principaux objectifs :

- préciser le fonctionnement hydraulique sous différentes sollicitations (brèche dans la grande levée, crues de l'Authion) ;
- préciser le rôle hydraulique de chacun des remblais de la zone d'étude ;
- fournir aux élus tous les éléments d'aide à la décision leur permettant de statuer sur le devenir (classement ou non) de ces remblais secondaires situés sur leur territoire ;
- fournir aux élus et aux services de l'État les résultats dans le cadre de la révision en cours du PPRi.

Afin de répondre à ces différents objectifs, l'approche technique s'est fondée sur un diagnostic des ouvrages et des modélisations hydrodynamiques bidimensionnelles sur l'ensemble du territoire. La décision des élus s'est appuyée sur les principaux critères suivants :

- Efficacité hydraulique des ouvrages : rôle de protection assuré par les ouvrages, conditions de vidange ;
- Obligations réglementaires : études de dangers, visites techniques approfondies, surveillance,...
- Aspects financiers : coûts d'investissement, d'entretien, de suivi ;
- Implications sur l'urbanisme : délimitation des zones de dissipation d'énergie en cas de classement.

Les élus ont choisi de demander le classement d'un système d'endiguement constitué d'un remblai qui s'avère être de premier rang, le principe de mise en transparence des remblais secondaires ayant par ailleurs été retenu.

### **Conclusions**

L'étude montre que la décision de classement de systèmes de protection contre les inondations est loin d'être évidente et que les élus ont besoin d'outils d'aide à la décision, sous forme d'analyse multi-critère par exemple, pour établir leur choix en toute connaissance de cause.

### **Abstract**

The downstream area of the river Authion valley is densely urbanized, especially in the towns of Trélazé and Ponts-de-Cé. This area, which was the right floodplain of Loire river before being protected by a 70 km long dyke, is today structured by many secondary levees: roads, railways...

Angers Loire Métropole, which will take the flood protection management on this area, has commissioned this study with main objectives:

- to specify the hydrodynamics under various stresses: flood of the river Authion, breach in the main dyke;
- to specify the influence of each secondary levee on hydrodynamics;
- to provide the elected officials with all the elements to take a decision on the opportunity to keep or not the levees in the protection system against flood;
- to provide the results of the study to define the urbanization rules on the area.

The last part of the study deals with the adaptation of the crisis management based on the elected officials' decisions.

### **Références :**

- J. Maurin, A. Boulay, R. Tourment, B. Beullac (2014), Etude de dangers des levées de Loire du val d'Authion digues de classe A.

# **Analyse de la performance d'un système d'endiguement complexe Exemple de Châtelailion-Plage**

## ***Performance analysis of a complex coastal protection system Example of Chatelailion-Plage***

**J. Dugor<sup>1</sup>, E. Ageorges<sup>2</sup>, M. Dupont<sup>3</sup>, J. Baills<sup>1</sup>, D. Rihouey<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Casagec Ingénierie, Anglet, [dugor@casagec.fr](mailto:dugor@casagec.fr)

<sup>2</sup> SILYCAF, Châtelailion-Plage, [e.ageorges@chatelailionplage.fr](mailto:e.ageorges@chatelailionplage.fr)

<sup>3</sup> SILYCAF, Communauté d'Agglomération de La Rochelle,  
[mathieu.dupont@agglo-larochelle.fr](mailto:mathieu.dupont@agglo-larochelle.fr)

### **Résumé**

L'article décrit les principales étapes permettant d'évaluer les performances du système d'endiguement sur la commune de Châtelailion-Plage selon le nouveau décret digue de 2015. Ce site d'étude est particulier car la ville s'est développée sur l'emplacement d'anciens marais endigués. La topographie est ainsi basse et la zone urbanisée est encerclée entre l'océan et les marais rétro-littoraux.

La définition du système d'endiguement doit donc prendre en compte l'environnement des digues de protection qui aura une influence sur leurs performances.

Tout d'abord, une méthode est mise en place pour définir les niveaux de protection apparents ou niveaux de sûreté de chaque secteur homogène en fonction des différents modes de submersion possibles. Un modèle numérique permet de calculer les sollicitations hydrauliques au pied de chaque ouvrage. Le niveau de protection apparent ou de sûreté de chaque tronçon est ensuite défini avec un ensemble d'hypothèses liées soit au débordement soit à la rupture d'ouvrage. Le niveau le plus faible de ces niveaux détermine ainsi le niveau de protection global du système d'endiguement de Châtelailion.

La plupart des ouvrages qui protègent la zone urbanisée de la grande Plage de Châtelailion sont sensibles aux franchissements par paquets de mer. Une analyse sur les niveaux de plage est donc effectuée pour définir les altitudes limites qui garantissent le niveau de protection du système d'endiguement. Cet exercice permet ainsi d'appréhender les travaux de rechargement et de reprofilage de la plage à réaliser le cas échéant.

Enfin, une analyse de l'influence des marais rétro-littoraux sur le risque de submersion de Châtelailion a été réalisée et deux scénarios ont été pris en compte : la défaillance fonctionnelle des ouvrages de l'exutoire et un niveau d'eau initial

élevé dans les marais.

*In fine*, cette étude illustre quelques exemples de difficultés techniques qui peuvent être rencontrés pour la définition des niveaux de protection selon la nouvelle réglementation.

## **Abstract**

This article describes main steps to assess performance of the Chatelaillon-Plage coastal protection system regarding the new French regulation on hydraulic safety: “decret digue 2015”. Main issues on this location is development of the urban area have been done over old dyked marshes. This low-lying town is surrounded between, on one hand by the ocean and on the other hand by marshes.

Thus, the coastal protection system has to take into account the coastal structure surroundings which will have impacts on their performances.

First of all, an original method is set up to define the different apparent protection levels and safety levels according to the various possible flood modes.

A numerical model is described and allows calculating the hydraulic solicitation at the toe of each coastal structure.

Then, apparent protection levels and safety levels are defined with assumptions regarding either overtopping or dyke breaches.

Most of the embankments which protect the urbanized area of la Grande Plage de Châtelailon are concerned by waves overtopping.

An analysis on beach level is achieved to define minimal altitude regarding the protection level displayed.

Furthermore, an analysis of the influence of the marshes is carried out to evaluate flood risk on Châtelailon. Two scenarios were taken into account: the failure of the exit gate and an initial high water level in marshes.

Finally, this study illustrates some examples of technical problems which can be observed for the definition of the protection levels according to the new French regulations.



# Projet « Isère amont » : 16 Champs d'Inondation Contrôlée (CIC) le long de l'Isère

## *The « Isère amont » project: 16 flood expansion areas all along the Isère river*

O. Manin<sup>1</sup>, A. Le Peillet<sup>2</sup>, C. Denizot<sup>3</sup>, L. Boutonnier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Symbhi (Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère), Grenoble,  
[olivier.manin@isere.fr](mailto:olivier.manin@isere.fr)

<sup>2</sup> EGIS, Seyssins, [arnaud.lepeillet@egis.fr](mailto:arnaud.lepeillet@egis.fr), [luc.boutonnier@egis.fr](mailto:luc.boutonnier@egis.fr)

<sup>3</sup> EGIS, Montpellier, [corinne.denizot@egis.fr](mailto:corinne.denizot@egis.fr)

### Résumé

Le projet « Isère amont » est porté en tant que maître d'ouvrage par le Symbhi (Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère). Son but est de prévenir les crues de l'Isère et de protéger les zones urbanisées de la vallée du Grésivaudan entre Pontcharra et Grenoble.

Les travaux ont démarré début 2012 pour une durée d'environ 9 à 10 ans, et un montant global à terme de 135 millions d'euros HT.

### Constat de l'état du lit de l'Isère avant le projet

Si la crue de 1859 se reproduisait de nos jours, en tenant compte de la configuration actuelle de la vallée (digues, autoroute, voie ferrée...), les dommages atteindraient 1 milliard d'euros. Pour autant, remonter les digues encore plus haut ne ferait que reporter les inondations plus en aval, et aggraver les dommages en cas de rupture de la digue.

Construites à la fin du 19<sup>e</sup> et au début du 20<sup>e</sup> siècle, les digues actuelles ont généré une forte instabilité du lit de la rivière, qui s'est traduite pendant plusieurs décennies par l'exhaussement rapide du lit autour de Brignoud et de Domène et son érosion en amont. À partir de 1950, la coupure du méandre de Bois Français et l'extraction des matériaux dans le lit endigué ont encore accentué l'instabilité. Après l'arrêt de ces extractions et sous l'influence des modifications du régime, provoquées par les aménagements hydro-électriques, le lit poursuit son enfoncement en amont et au contraire, a tendance à s'alluvionner de Brignoud à Gières sous l'effet des dépôts de graviers, de sables et de limons.

La vallée du Grésivaudan a perdu en 20 ans 30 % de sa forêt alluviale. Les digues existantes, construites au ras du lit de la rivière, l'enserment et la coupent des milieux qui lui sont normalement associés : forêt alluviale, mais aussi bras morts, marais.

L'Isère constitue entre Pontcharra et Grenoble un axe vert qui est peu valorisé : à

l'exception de quelques bases de loisirs situées sur d'anciennes gravières, la fréquentation des berges et digues est peu organisée.

### **Les objectifs du projet**

Face au constat des risques liés aux crues et des dégradations du milieu naturel, le projet s'est fixé les cinq objectifs suivants :

1. Protéger les zones urbanisées jusqu'à une crue de période de retour de 200 ans (crue type de celle de 1859),
2. Protéger les zones agricoles jusqu'à une crue de période de retour de 30 ans,
3. Assurer la stabilité du lit de l'Isère tout en minimisant les curages d'entretien,
4. Promouvoir la restauration environnementale de la rivière et de ses annexes : forêt alluviale, marais, anciens bras...,
5. Participer à la mise en valeur de l'axe vert Pontcharra - Grenoble du point de vue des loisirs liés à ces mêmes milieux naturels.

La mesure phare de ce projet est la mise en place de zones d'expansion de crue à grande échelle : tous les écoulements au-delà de la crue trentennale sont stockés dans 16 champs d'inondation contrôlée, ou « CIC ». Le stockage dans ces zones est optimisé pour recevoir entre 1 et 2 mètres d'eau pour la crue bicentennale. Les CIC permettront d'écrêter le débit de l'Isère, de 1 890 m<sup>3</sup>/s à Pontcharra, à l'entrée du système en amont, à 1 240 m<sup>3</sup>/s à l'aval à Grenoble.

### **Abstract**

The Symbhi (Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère) has contracted the "Isère amont" project. It aims at preventing floods and protecting urban areas in the Grésivaudan valley between Pontcharra and Grenoble.

The key measure of the project is the expansion of flood areas: all of the flows, over a 30-year return period flood, are in 16 controlled expanding flood areas called "CIC" (champs d'inondation contrôlée). The storage in these areas is optimised to receive 1 to 2 metres of water in case of a bicentennial flood. The areas will allow regulating the Isère high flow from 1,890 m<sup>3</sup>/s in Pontcharra to 1,240 m<sup>3</sup>/s in Grenoble.

Expanding flood areas are supplied by spillways or by removable floodgates. Ditches and agricultural drainage channels handle the emptying of these areas. No human intervention is necessary, and a remote surveillance will be implemented for the control of the system's exploitation.

All the natural and agricultural areas in the Grésivaudan valley will be used for the storage, which represents 3,500 ha, one of the major projects in progress nationally. Works started in 2012 and are expected to last approximately 9 to 10 years for a total EUR 135 million (duty-free).

# **Retours d'expérience d'études préliminaires d'aide à la décision pour la définition des systèmes d'endiguement**

## ***Feedbacks on preliminary and decision making support studies to define systems of flood protection dykes***

**J. Savatier<sup>1</sup>, G. Gonzalez<sup>1</sup>, A. Darthos<sup>2</sup>,  
E. Capdevielle<sup>2</sup>, C. Huveteau<sup>3</sup>, S. Galabrun<sup>3</sup>, S. Marliac<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> ISL Ingénierie, Saint-Jean-de-Luz, [savatier@isl.fr](mailto:savatier@isl.fr)

<sup>2</sup> Institution Adour, Mont-de-Marsan, [aurelie.darthos@institution-adour.fr](mailto:aurelie.darthos@institution-adour.fr)

<sup>3</sup> Communauté d'Agglomération Pays Basque, Urrugne,  
[c.Huveteau@communaute-paysbasque.fr](mailto:c.Huveteau@communaute-paysbasque.fr)

<sup>4</sup> Agglomération d'Agen, [stephane.marliac@agglo-agen.fr](mailto:stephane.marliac@agglo-agen.fr)

### **Résumé**

Dans le cadre de la mise en place de la Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations (GEMAPI), ISL a réalisé pour l'Institution Adour, l'Agglomération d'Agen et la Communauté d'Agglomération Pays Basque des études préliminaires et expertises des ouvrages susceptibles d'assurer une protection contre les inondations et des analyses multicritères pour l'aide au choix des ouvrages à retenir comme système d'endiguement.

La communication a pour objectif de rappeler succinctement la nouvelle réglementation, de présenter les méthodes utilisées afin de définir en première approche les enjeux potentiellement protégés par les ouvrages étudiés, de définir les scénarios de systèmes d'endiguement potentiels.

L'approche générale d'analyse a consisté à réaliser une analyse par système d'information géographique des données topographiques et hydrauliques disponibles afin de déterminer par report de crête de digue ou de ligne d'eau en crue les zones protégées potentielles maximales puis de réaliser un décompte des populations comprises dans ces zones selon les données de l'INSEE. Cette première analyse étant complétée par des visites d'expertise de terrain permettant de préciser ces analyses et d'apprécier de façon préliminaire l'état de l'ouvrage.

Les coûts de la réalisation des dossiers de demandes et des confortements à prévoir (estimés de façon préliminaire) afin d'apporter une réelle protection ont ensuite été évalués afin de donner aux collectivités compétentes un ordre de grandeur des coûts et dépenses à prévoir pour la gestion de ces potentiels systèmes d'endiguement.

Lorsque c'était possible, il a été proposé des scénarios de gestion alternative de mise en retrait des digues et de restauration de champs d'expansion des crues.

Les apports de ces études ont été d'écarter une partie des ouvrages ne correspondant pas à la définition du système d'endiguement, compte tenu de la population protégée potentielle trop faible (inférieure à 30 personnes) et d'aider la structure GEMAPIenne au positionnement ou à la réflexion sur une typologie de scénario de protection inondation avant d'engager la démarche de classement.

Les principales conclusions sur les potentiels systèmes d'endiguement étudiés sont que :

- la réglementation est exigeante en termes de responsabilité et de niveau de performance des ouvrages,
- les potentiels systèmes d'endiguement étudiés ont majoritairement des niveaux de protection faibles à très faibles. S'ils sont retenus, ils doivent faire l'objet de travaux de confortement coûteux pour permettre une protection effective des enjeux en zone protégée potentielle,
- La population protégée (typiquement quelques dizaines à centaines de personnes) ne permettrait pas toujours d'obtenir une analyse coût bénéfice positive.

Les limites de ces études sont que sur la plupart des ouvrages étudiés, la connaissance est faible ou partielle en termes d'hydrologie et d'hydraulique (absence dans la plupart des cas de lignes d'eau en crue avec période de retour associée) ainsi que sur les ouvrages (topographie, géotechnique, etc.).

Des études complémentaires de définition du scénario de protection et du niveau de protection devront être menées pour les systèmes d'endiguement que les structures GEMAPIennes comptent retenir.

## **Abstract**

On behalf of the Institution Adour, the Urban Area of Agen and the Basque Country Urban Community, ISL had realized preliminary studies and expertise of hydraulic structures and dykes which are likely to protect against flood, followed by multi-criteria analysis to help the local authorities to decide on which dykes to maintain as official flood protection systems in respect of the new French regulations on dykes and flood protection and the set up of the competence "Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations" (GEMAPI) – Aquatic environment and flood management.

The purposes of this paper is to briefly remind the new regulation, to introduce the methods applied in order to define in first approximation the population and economic stakes potentially protected by the studied dykes, to define the flood protection systems that should be officialized, to estimate their costs of regularization and finally to conclude on the main issues raised by the implementation of the new regulation.

Practical examples are presented in order to illustrate the feedbacks of the studies and the issues.

# Révision du système d'endiguement de Portiragnes-plage

## *Diking system review of Portiragnes-plage*

G. Sénéchal<sup>1</sup>, M.H. Prost<sup>1</sup>,  
A. Salmi<sup>1</sup>, S. Théron<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ISL-Ingénierie, Montpellier, [senechal@isl.fr](mailto:senechal@isl.fr)

<sup>2</sup> Communauté d'Agglomération Hérault Méditerranée, Saint-Thibéry,  
[s.theron@agglohm.net](mailto:s.theron@agglohm.net)

### Résumé

La commune de Portiragnes, et notamment sa frange littorale que constitue Portiragnes-plage, se trouve au cœur d'un lieu d'échanges hydrauliques complexes auxquels participent les crues de l'Orb, les crues du Libron, les entrées maritimes en cas de tempêtes en mer et les déversements ponctuels du canal du Midi.

Les évènements passés (notamment 1995, 1996 et, plus récemment, 2014) sont les témoins du caractère inondable de Portiragnes-plage, située entre l'ancien Grau du Libron, la Grande Maïre et le canal du Midi qui peut déverser en cas d'épisodes pluvieux importants.

En guise de protection, ce territoire à forts enjeux économiques et touristiques est ceinturé par des éléments naturels et ouvrages artificiels, à savoir :

- une dune de front de mer, longue d'environ 1 500 m et d'une largeur moyenne de 40 m,
- de portions d'anciennes digues agricoles,
- d'une digue plus récente réalisée pour la protection contre les inondations et disposant, en crête, d'une piste cyclable.

Ces ouvrages, dont le gestionnaire est la Communauté d'Agglomération Hérault Méditerranée (CAHM), ne sont aujourd'hui pas déclarés en tant que système d'endiguement contre les inondations et ne font donc pas l'objet d'un suivi et d'un entretien adaptés.

Pour se conformer à la réglementation et assurer une prévention contre les inondations optimale, le système de protection complet est à revoir. Ce système a pour vocation la protection d'une population très variable en fonction des saisons (de 400 résidents à l'année, le secteur a une capacité d'accueil de près de 25 000 personnes au plus fort de la saison estivale).

Une des spécificités du site est un accès unique hors période de crue (RD37) qui est coupé dès les premiers débordements de l'Orb et du canal du Midi. Cette route qui

traverse sur 600 m un des axes d'écoulement majeur en crue ne peut être surélevée sans léser des populations diffuses implantées en amont. En crue, Portiragnes-Plage est donc inaccessible car totalement ceinturée par les crues et cela pendant plusieurs jours comme l'a montré la crue de 1996.

Ainsi, la révision de l'aménagement de protection doit intégrer :

- des problématiques techniques de conception d'ouvrages de protection dont les sollicitations sont multiples (crues, tempêtes, vagues) associé à un contexte géotechnique difficile caractéristique des milieux estuariens ;
- des problématiques de prévision et de gestion de crise, pour assurer la mise en sécurité des personnes situées à l'intérieur du système de protection, notamment pour les événements dépassant l'objectif de protection (évacuation *a priori* impossible, la seule route d'accès étant inondée dès le début des événements).

L'objet de la communication est de présenter le contexte et les choix techniques qui ont été adoptés pour définir et sécuriser le nouvel aménagement de protection tout en assurant la mise en sécurité des personnes en cas de dépassement des niveaux de protection.

### **Abstract**

This paper presents the dyke system review of Portiragnes-Plage (Hérault department), located on the Mediterranean coast and in the floodplain of the Orb River.

After an overview of the diagnosis, this document aims to present the technical choices that have been made to design a protection system adapted to the local context (multiple cases of floods, storms and waves). The design intends the removal of existing structures and the implementation of filled embankments from 1 to 2,5 m in height (as a 100-year flood protection), which are protected by a rockfill shell in the sectors that are most prone to waves. Additionally, a temporary cofferdam is planned, in order to close the system on road CD37, the only access to the station. A cost-benefit and multi-criteria analysis verifies the socio-economic relevance of these developments.

A second part is dedicated to the crisis management strategy that must be realized in addition to the protection system, to ensure people safety in the station (population may range from 400 to 25 000 people). Indeed, even in case of highly frequent events, the access to the station is cut by the floods, which isolate the sector. Since the anticipation of these phenomena is impossible in the majority of situations, the municipality can not consider preventive evacuation as a solution. Thus, the strategy is shifted towards ensuring security within the station, by identifying safe areas in public buildings and by implementing surveillance and communication protocols in normal and crisis period. Exchanges with the SDIS34 have made it possible to refine this strategy, whose implementation must be carried out in the future in the context of the PAPI (flood prevention action plan) of the Orb and Libron Rivers.

# Digues maritimes des Moutiers-en-Retz Système d'endiguement et stratégie de protection

## *Sea levee – Les Moutiers-en-Retz Protection system and strategy*

A. Tardieu<sup>1</sup>, F. Eenselme<sup>2</sup>, A. Boulay<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ISL, [tardieu@isl.fr](mailto:tardieu@isl.fr), [boulay@isl.fr](mailto:boulay@isl.fr)

<sup>2</sup> PORNIC Agglo Pays de Retz, [fenselme@pornicagglo.fr](mailto:fenselme@pornicagglo.fr)

### Résumé

#### Introduction

L'article détaille le choix des travaux de rehausse et confortement des digues maritimes du littoral des Moutiers-en-Retz gérées par la Communauté de Communes Pornic Agglo-Pays de Retz. Il présente les spécificités des ouvrages et des modes d'inondation et indique comment cela s'est traduit réglementairement avec l'évolution de la réglementation sur les digues (décret 2015).

#### Méthode et résultats

Les digues classées concernent l'ensemble du linéaire communal littoral. Elles ont été construites entre la fin du 19<sup>e</sup> et le XX<sup>e</sup> siècle et correspondent principalement à des perrés maçonnés appuyés sur une dune. Elles sont occupées en crête par une promenade puis des habitations. Des épis sont également présents.

L'analyse des ouvrages et de la topographie amène à redéfinir le système de protection : un tronçon est à dissocier car protégeant à lui seul un petit val ; deux tronçons relèvent davantage de protections côtières car le terrain en arrière est en altitude ; les dunes sont à considérer en éléments naturels et enfin, un tronçon limitrophe est à raccrocher à un autre système (autre gestionnaire).

L'analyse de l'événement Xynthia montre que les ouvrages n'ont pas connu de brèche, mais que les inondations sont dues à des franchissements par paquets de mer. La zone inondable est surtout critique au Nord où les terrains protégés sont bâtis dans une cuvette ; en partie centrale, une zone naturelle de marais est capable de tolérer sans conséquences des entrées d'eau et le ressuyage venant de la zone urbanisée ; au Sud ce sont surtout les installations portuaires et quelques bâtis situés en crête de digue qui sont vulnérables.

Les modélisations ont permis de définir les secteurs où les entrées d'eau étaient les plus importantes et de définir ainsi les aménagements les plus pertinents à créer.



FIGURE 1: LES STRATEGIES DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

Le rôle des épis est prépondérant pour conserver un bon ensablement de plage (1<sup>re</sup> barrière) et limiter de ce fait les débits de franchissement. Ces ouvrages, qui n'étaient pas inclus dans le classement des digues selon le décret 2007, seront intégrés dans le futur système d'endiguement.

Les perrés (2<sup>e</sup> barrière) ont pour rôle d'empêcher l'érosion du corps de digue et de dune. Leur niveau de sureté est à conserver. Sur le secteur du boulevard de l'Océan qui est une des principales entrées d'eau, le perré est rehaussé par un mur chasser-mer pour limiter les débits de franchissements. Sur les autres secteurs, les aménagements sont privilégiés en arrière digue (3<sup>e</sup> barrière), c'est-à-dire en crête mais côté zone protégée en construisant des murs munis de batardeaux. À noter que les maisons et murets de clôtures de riverains jouent également un rôle de protection contre les inondations dans ces configurations.

## Conclusions

En contexte maritime, les phénomènes en jeu de submersion et de défaillance des digues apparaissent bien différents de ceux étudiés pour les digues fluviales.

Les niveaux de protection sont également difficiles à définir compte tenu de l'interférence de nombreux paramètres (niveau statique, surcote, houle, vent), alors même que cette notion devient un engagement majeur du gestionnaire.

## Abstract

The coast of Moutiers-en-Retz extends about 8 km in Loire Atlantique, close to Vendée and constitutes the northern border of "the Breton marsh", along the Bay of Bourgneuf. The coast is defended by different structures: dikes, masonry protections, dunes, groynes, gates and locks. The dikes range in class C as defined by the 2007 decree. In 2010, storm Xynthia led to a large flood of houses.

The PAPI Bourgneuf Baie, validated in 2013, planned works to be conducted on the dykes have been validated in 2013. The works take place in 2017-2018. In the study area, floods are mainly due to overtopping (coast) and overflow (Port du Collet).

The article presents the comprehension of the natural hazards, the choice of reinforcement and how it is taken in account with french regulation.



# Digue de protection du village de Codolet contre les inondations du Rhône et de la Cèze

## *Dike of protection of Codolet against the floods of the Rhône and the Cèze*

**P. Soulat<sup>1</sup>, A. Bonnafé<sup>1</sup>, S. Bayart<sup>2</sup>, S. Boissin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Safège/Suez Consulting, [patrick.soulat@suez.com](mailto:patrick.soulat@suez.com), [arnaud.bonnafé@suez.com](mailto:arnaud.bonnafé@suez.com)

<sup>2</sup> Commune de Codolet, [sbayart@codolet.fr](mailto:sbayart@codolet.fr); [boissin@codolet.fr](mailto:boissin@codolet.fr)

### Résumé

Suite aux crues de la Cèze en Septembre 2002 et du Rhône en décembre 2003, la commune de Codolet a décidé de mettre en œuvre un Programme d'Aménagement de lutte contre les inondations de ces deux cours d'eau, afin de protéger la population de son village qui compte 680 habitants.

Les travaux engagés par la Commune de Codolet et terminés en 2015, ont consistés à réaliser les ouvrages suivants :

- Une digue de protection rapprochée du bourg de Codolet, au Nord et à l'Ouest du bourg (côté Cèze), de 1 400 m de long.
- La rehausse de la digue Est (coté lône du Rhône), et la reconstruction de la digue Sud existante, sur environ 1 500 m ;
- L'aménagement d'un déversoir sur la digue Sud existante, Ce déversoir est équipé d'un « pertuis de fond » batardable permettant d'assurer le ressuyage gravitaire de la plaine inondable, avec réseau de colature le long de la digue Nord et Ouest ;
- Deux portes sur les voiries d'accès permettent de fermer l'enceinte en cas de crue, les autres voiries franchissent la digue avec des « dos d'âne ».

L'arrêté d'autorisation au titre de la loi sur l'eau du 03/01/2013 classe les ouvrages du système d'endiguement en catégorie C (au sens du décret 2007).

L'article décrit le système d'endiguement ainsi aménagé par la Commune de Codolet, et notamment la particularité de la structure de la digue de protection rapprochée constituée :

- d'une paroi « trenchmix »
- d'un mur de soutènement en béton armé,
- d'une recharge en BCR (Béton Compacté au Rouleau),
- de sol traité entre la paroi trenchmix et le mur de soutènement,

L'aménagement de ce système d'endiguement a fait l'objet d'un programme global de maîtrise d'œuvre et de travaux, qui s'est terminé en 2015 et dont l'historique est présenté dans l'article.

## Abstract

Further to the floods of the Rhône in December, 2003 and the Cèze in September, 2002, the municipality of Codolet decided to implement a construction program to protect the village against the floods of these two rivers.

The works committed by the Municipality of Codolet consisted in building a closer dike (DPR) of the village on the West and in the North of the village as well as in making higher the dike in the South.

The works ended in 2015, consisted in realizing:

- A closer protection dike in the North and on the West of the village (on Cèze side), of 1 400 m of length.
- Making higher existing dike in the South and East, on approximately 1 500 m;
- Construction of an overflow on the existing South dike. This overflow is equipped with flood gate allowing to insure the ressuage of the flooded plain, with network of colature;

Two doors on the public road networks to access the village, allow to close the surrounding wall in case of floods.

The article describes the system of protection dyke so fitted out by the Municipality of Codolet, in particular the special structure of the dike of closer protection, with:

- a trenchmix wall in the foundation,
- an armed concrete wall,
- a RCC bank,
- of treated soil between the trenchmix wall and the concrete wall,

The article presents the history and the experience feedback of the dike system construction, which combines several and sometimes unusual techniques for this type of hydraulic structure.

# **La digue multifonctionnelle : une alternative pour intégrer le risque d'inondation dans l'aménagement urbain**

## ***The multifunctional dike: An alternative for integrating flood risk into urban planning***

**A.-L. Moreau<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> CEPRI, Orléans, France, [anne-laure.moreau@cepri.net](mailto:anne-laure.moreau@cepri.net)

### **Résumé**

La notion de digue multifonctionnelle signifie que la digue peut contenir plusieurs usages. Elle englobe des réalités très diverses. Par exemple, peuvent être qualifiés d'ouvrages multifonctionnels, des digues supportant une route au niveau de leur crête, une piste cyclable, un chemin de promenade, des parkings, des quais, voire des habitations ou des infrastructures plus conséquentes (réseau ferré). Si ces ouvrages sont les cas les plus courants en France, d'autres pays réfléchissent à des combinaisons d'usages plus complexes sur les digues pour économiser le foncier souvent rare et cher dans les centres urbains denses (exemple de voiries dans le corps de la digue dans le projet Boompjes City Balcony à Rotterdam ou sur la crête de la digue, ou des centres commerciaux situés sous la digue par exemple).

Si cette solution a l'avantage de concilier protection et développement urbain, elle pose néanmoins un certain nombre de questions techniques, portant sur la capacité d'une digue à contenir des voiries dans le corps de l'ouvrage par exemple, tout en continuant à assurer efficacement sa fonction de protection.

Dans le contexte français où la compétence relative à la gestion des milieux aquatiques et à la prévention des inondations (gemapi) est entrée en vigueur au 1er janvier 2018, la question de la responsabilité de l'entretien d'un tel ouvrage se pose également. Les multiples usages impliquent l'intervention de multiples acteurs sur l'ouvrage. Cela peut avoir pour conséquence de renforcer l'attention portée au bon entretien de l'ouvrage et à sa surveillance. Mais cela peut également complexifier la répartition des rôles notamment en cas de crise, voire diluer les responsabilités.

Pour autant, l'intégration d'un ouvrage multifonctionnel au sein d'un aménagement urbain représente une alternative pour plusieurs territoires aujourd'hui abrités derrière des digues. Par exemple, la ville de Saint-Pierre-des-Corps s'est engagée dans cette réflexion à l'issue de l'atelier national dont elle était l'un des territoires pilotes.



FIGURE : PROPOSITION D'AMENAGEMENT D'UNE DIGUE MULTIFONCTIONNELLE DANS LE CADRE DU PROJET BOOMPJES CITY BALCONY A ROTTERDAM (PAYS-BAS).  
SOURCE : DE URBANISTEN.

### Abstract

The notion of multifunctional dike encompasses a wide variety of realities. It means that the dike can have several uses. For example, dikes supporting a road at their ridge, a bike path, a pathway, or even housing or more important infrastructure (railway network) can be qualified as multifunctional structures. While these structures are the most common cases in France, other countries are considering more complex combinations of uses on dikes to for spatial optimization, land is often rare and expensive in densely urban centres (example of roads built into the body of the dike in the Boompjes City Balcony project in Rotterdam or on the crest of the dyke, or shopping centres located into the dyke, for example).

While this solution has the advantage of reconciling protection and urban development, it nevertheless raises a number of technical issues bearing on the capacity of a dike to contain roads, for example, in the body of the structure while at the same time continuing to efficiently ensure its function of protection.

In the French context where the competence relating to the management of aquatic environments and the flood prevention (gemapi – gestion des milieux aquatiques et prévention de inondations) came into effect on 1 st January 2018, the question of the responsibility for the maintenance of such structures also arises. Multiple uses involve the intervention of multiple players on the multifunctional flood defence system. This may result in increasing the attention devoted to dike management and its supervision. However, it can also make the distribution of roles complex, particularly in case of crisis.

However, the integration of a multifunctional levee within an urban development represents an alternative for several territories today sheltered behind dikes. The city of Saint-Pierre-des-Corps, for example, engaged on this reflection at the end of the national workshop of which it was one of the pilot territories.

# La prévention des inondations, protection ou adaptation ?

## *Prevention of floodrisk, protection or adaptation?*

S. Bidault<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre européen de prévention du risque d'inondation, Orléans,  
[stephanie.bidault@cepri.net](mailto:stephanie.bidault@cepri.net)

### Résumé

Les effets du changement climatique vont largement se faire ressentir dans les prochaines années, augmentant la violence des épisodes de type cévenol, renforçant le phénomène d'érosion côtière et augmentant l'alternance de périodes de « manque d'eau » et de « trop d'eau ». Les assureurs s'y préparent annonçant des chiffrages de dégâts très importants à l'aune de 2040 (13 milliards d'euros d'impacts projetés). Mais les chiffres de la vulnérabilité de notre territoire au risque inondation sont d'ores et déjà sans appel : 17 millions de personnes soumises potentiellement au risque de débordement de cours d'eau (soit 1 habitant sur 4 et 1 emploi sur 3) et 1,4 million, au risque de submersion marine. Longtemps l'étude de l'aléa a primé sur celle de la vulnérabilité. La politique de prévention des risques d'inondation s'est caractérisée, depuis son origine par une place prépondérante donnée aux systèmes de protection. L'homme depuis toujours cherche à se protéger des aléas naturels, action consistant à empêcher au maximum l'eau d'envahir des lieux occupés par l'activité humaine, par des digues, barrages ou mesures structurelles lourdes. Il apparaît aujourd'hui nécessaire de mettre davantage l'accent sur d'autres axes de la politique de prévention. Le champ de la vulnérabilité reste un champ à explorer et qui n'a pas encore laissé entrevoir tous ses bénéfices. Des outils nous y invitent depuis une dizaine d'années.

Le Conseil de l'Union européenne et le Parlement ont adopté une Directive sur la prévention et la gestion des conséquences négatives des inondations par les territoires. (2007/60 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation du 23 octobre 2007). Ce ne sont pas les inondations en elles-mêmes qui posent problème mais les conséquences dommageables qu'elles produisent sur des territoires mal préparés à les supporter.

Même si l'action sur les phénomènes physiques reste très attractive et fascinante, mobilisant encore la majorité des financements (plus de 80% du financement de la prévention est réservé à la protection), des actions de réduction de la vulnérabilité se multiplient. Mais l'héritage de notre passé justifie encore la place accordée aux solutions techniques et à l'aléa. Les ingénieurs apportent des réponses techniques que les décideurs politiques décident ou non d'appliquer.

Au regard de ces constats, la compétence GEMAPI (gestion des milieux aquatiques

et prévention des inondations) pose questions. L'arsenal réglementaire sur les ouvrages couplé à cette compétence GEMAPI et reprenant la base des études de dangers déjà instaurées en 2007, présente un intérêt certain pour l'amélioration des connaissances et le partage d'informations. Partager une vision claire des limites des systèmes de protection présente indéniablement une avancée dans la politique de prévention. Le recours plus systématique aux méthodes d'analyse multicritères (AMC) oblige aussi à avoir une réflexion plus globale pouvant ainsi inviter à une pluralité d'actions, au-delà de la gestion des digues. Malgré tout, il semble légitime de s'interroger : la GEMAPI va-t-elle être un facteur de changement ou au contraire revenir sur une vision très technique de notre politique de prévention ?

### **Abstract**

The effects of climate change will be largely be felt in the coming years, increasing the violence of extreme Mediterranean rainfall episodes, reinforcing the phenomenon of coastal erosion and augmenting the alternation of periods of "lack of water" and "too much water". Insurers are preparing for this, announcing very significant damages by 2040 (with a projected impact of 13 billion euros).

The figures of vulnerable flood risk territory appear unquestionable: 17 million people are potentially exposed to river overflowing risk. For a long time, protection policies have prevailed over those of vulnerability reduction. Since its inception, the flood risk prevention policy has been mainly directed towards protection systems. Man has always sought to protect himself from natural hazards by dikes, dams or hard bank fixation measures. Nowadays more emphasis is needed on other areas of the prevention policy. The vulnerability scope requires further exploration in order to reveal all its potential benefits.

The European Commission has adopted a Directive for preventing and managing flood negative consequences (2007/60 on the assessment and management of flood risks of 23 October 2007). It is not the natural phenomenon that causes the problem, it is the non-adaptation of the territory to the flood consequences.

Despite the fact that actions on hazard risk reduction appear more attractive and fascinating, and they largely mobilize the majority of funding, actions aimed at reducing vulnerability are multiplying. Yet the past legacy still justifies the role given to technical solutions and hazard.

Therefore the new GEMAPI competence (gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations - management of aquatic environments and flood prevention) raises some questions. Since 2007, regulations have improved the knowledge on protection systems (hazard studies). GEMAPI competence has strengthened the regulation on this point to promote the information sharing on protective works.

The more systematic use of multicriteria analysis methods (MCA) also requires a more global reflection and a plurality of actions. Nevertheless, it is legitimate to wonder: will the GEMAPI be a factor of change or, conversely, will it return to a very technical vision of our prevention policy?

# Les tertres dans les systèmes d'endiguement de la Loire

## *Hillocks or artificial mounds and Loire levees*

S. Patouillard<sup>1</sup>, J. Maurin<sup>2</sup>, P. Mériaux<sup>3</sup>, R. Tourment<sup>3</sup>,  
B. Beullac<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dreal Centre-Val de Loire, Orléans,

[sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr](mailto:sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr)

<sup>2</sup> Expert consultant, Saint Denis de l'Hôtel, [jean.maurin45@gmail.com](mailto:jean.maurin45@gmail.com)

<sup>3</sup> Irstea, Aix-en-Provence, [contact@irstea.fr](mailto:contact@irstea.fr)

### Résumé

Les levées de Loire et les tertres sont les principaux composants historiques des systèmes de protection contre les inondations de la Loire. A compter du 1er janvier 2018, la réglementation française fait porter la responsabilité des ouvrages de protection aux établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI-FP), en tant que gestionnaires des digues. Dans ce contexte, les nouveaux gestionnaires posent la question d'intégrer ou non les tertres dans les systèmes d'endiguement. Par ailleurs, les EPCI-FP, en tant qu'acteurs de l'aménagement du territoire, interrogent sur l'opportunité de créer de nouveaux tertres à partir des digues pour diminuer la vulnérabilité des populations.

Dans un premier temps, nous avons proposé de définir ce que sont les tertres par l'approche historique dans le val de Loire et nous avons explicité les notions réglementaires et techniques concernant les systèmes de protection comprenant des digues ou des levées afin de vérifier le choix qui semble être laissé au gestionnaire pour la prise en compte ou non des tertres dans le système d'endiguement. Dans un second temps et s'inspirant des réflexions menées au Japon et aux Pays-Bas, nous avons présenté et analysé l'étude de renouvellement urbain de Saint-Pierre-des-Corps qui propose d'adosser des tertres à la digue.

Les tertres sont les aménagements de lutte contre les inondations les plus anciens connus sur la Loire. Souvent édifiés le long des berges, ils ont pu être reliés par des tronçons de digues durant la période de l'édification des levées de la Loire. Ainsi, ils assurent la continuité de certains systèmes d'endiguement. La réglementation en France conduit les gestionnaires de digues à définir les systèmes d'endiguement. Ces systèmes peuvent comprendre plusieurs tronçons de levées ainsi que les ouvrages et équipements permettant d'assurer leur bon fonctionnement ; mais en sont exclus « les éléments naturels ». Nous avons montré que les tertres étaient plus ou moins anthropiques et qu'il était parfois difficile de les qualifier de naturels. Pour autant, même s'ils ne sont pas intégrés dans le système d'endiguement, nous avons fait le constat que cela n'avait pas d'impact sur l'analyse du risque qui porte sur le

système de protection et la zone protégée.

En s'appuyant sur des projets récents au Japon et aux Pays-Bas concernant les « super digues » et les « digues multifonctionnelles », la réalisation de tronçons de tertre adossé à la digue de Loire a été étudiée à Saint-Pierre-des-Corps. Pour ce type de nouvel aménagement nous avons proposé d'adopter une largeur d'une centaine de mètres pour cinq mètres de hauteur afin de garantir un gradient suffisamment faible pour résister à l'érosion. S'agissant d'un nouvel aménagement, il a paru également opportun de proposer de l'accompagner d'une approche type étude de dangers d'ouvrage hydraulique de façon à définir la largeur nécessaire pour que sa rupture devienne quasi improbable et traiter les zones de transition physique entre ce tertre et les tronçons de digues qui s'y raccorderaient.

Pour autant, toutes les questions d'ordre juridique, technique et social ne sont pas épuisées pour permettre la construction de nouveaux tertres et notamment : comment démontrer au cas par cas que l'impact d'un remblaiement en lit majeur derrière une digue serait faible au regard de l'intérêt de sécuriser une urbanisation importante ? Et comment assurer la pérennité de ces aménagements à long terme ?

### **Abstract**

Along the Loire River, flood risk protection systems often includes "mounds" referring to hamlets or old properties located on the higher areas of the river floodplain.

Due to new French rules, it is now mandatory for levees managers to define flood risk protection systems: these systems include any levees and others protection equipments except the natural ones.

It is difficult to define if a mound is completely natural or not.

Nevertheless they take part in the protection system.

Transforming levees into mounds would allow building new constructions, roads or parks. This reflection has already been conducted in other countries and resulted in concrete projects, but they mainly concerned farms or large sets in rather rural sites or on a large plot. In our case, the question arises in a dense urban and fragmented environment.

Creating artificial mounds raises several technical and legal issues or difficulties:

- Which status will the mound have after construction?  
Will it still be a protection structure?
- From which width can a mound be regarded as highly unlikely to breach?  
What is the impact of the soil foundation in the evaluation of this width?

This article presents how existing mounds could be classified and sums up current knowledge and reflections about the opportunity to transform levee into mound.



# **Caractérisation de systèmes d'endiguement à l'heure de la GEMAPI Application au territoire de l'agglomération troyenne**

## ***Identification of flood defence systems A case study in the city of Troyes, North East of France***

**A. Brune<sup>1</sup>, B. Beullac<sup>2</sup>, P. Mériaux<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Cerema Méditerranée, [anne.brune@cerema.fr](mailto:anne.brune@cerema.fr)

<sup>2</sup> Irstea, [bruno.beullac@irstea.fr](mailto:bruno.beullac@irstea.fr)

### **Résumé**

En 2014, la loi MAPTAM introduit la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations) qui est dévolue aux EPCI (établissement public de coopération intercommunale) à fiscalité propre à compter de janvier 2018. Cette compétence inclut une mission de protection contre les inondations et contre les submersions. En mai 2015, la réglementation sur les ouvrages hydrauliques évolue : les digues de protection contre les inondations sont considérées dans un ensemble hydrauliquement cohérent formant le « système d'endiguement », géré par l'entité en charge de la compétence GEMAPI. Il appartient notamment au gestionnaire des endiguements de déterminer la zone que le système est en capacité de protéger, de s'organiser pour en garantir la protection et de prévoir la mise en sécurité en cas de dépassement du niveau de protection.

Afin d'envisager l'application de ces nouveaux concepts sur des territoires complexes, un accompagnement a été réalisé pour le compte de la collectivité de Troyes Champagne Métropole.

Une méthodologie a été élaborée, permettant de caractériser les systèmes d'endiguement en tenant compte des ouvrages existants, et dont les grandes étapes sont les suivantes :

- une recherche bibliographique dont l'objectif est d'extraire des données sur les zones inondables, les principales crues marquantes et l'organisation déjà en place pour se prémunir du risque inondation. Elle doit permettre également un premier repérage des enjeux protégés et ouvrages contribuant à la protection ;
- une analyse cartographique permettant de localiser les enjeux, zones à protéger et ouvrages concernés ;
- des analyses hydrauliques pour estimer les niveaux de protection et enveloppes de zones protégées. Également pour comprendre le rôle des ouvrages et les

- différentes configurations de systèmes possibles ;
- la programmation d'études complémentaires pour confirmer les enveloppes de zones protégées et niveaux de protection.

Pour chaque étape, sont précisés les objectifs, les outils disponibles, et points d'attention.

La méthodologie développée permet d'aboutir à différents scénarios de gestion définissant un ou plusieurs systèmes d'endiguement et d'envisager à chaque fois les impacts sur les niveaux de protection, l'organisation du gestionnaire, les études complémentaires à réaliser. Le choix final de définition du ou des systèmes d'endiguement est du ressort de la collectivité et peut évoluer au cours du temps.

L'appel à partenariats lancé par le Cerema et l'Irstea en 2016, a donné lieu à différentes études de cas de systèmes d'endiguement en contexte fluvial, maritime, ou maritimo-fluvial, dont les résultats ont vocation à être diffusés dans un objectif d'apport de méthodologie aux collectivités en charge de la GEMAPI.

### **Abstract**

In 2016, Cerema (Centre for studies and expertise on Risks, Environment, Mobility and Urban and Country Planning) and Irstea (National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture) launched partnerships with local authorities, to provide assistance in carrying out their new missions in flood prevention and aquatic environment management. Nine of them applied as they needed technical support with the implementation of these new competences from January 1<sup>st</sup>, 2018. A few years before, in 2015, the regulation framework on hydraulic works had been reinforced. As a consequence, local authorities now have to reach specific objectives on identification and supervision of flood defence systems.

The new regulation framework on flood defence systems leads local authorities in charge of flood prevention to reconsider how their territories are protected, and how hydraulic structures take part into flood protection.

Local authorities have thus to identify where flood defence systems can be defined and with which structures. They have to determine the level of protection and the limits of the protected areas. They also have to organize the surveillance and maintenance of the flood defence systems and carry out compulsory studies, such as risk analysis.

This paper describes one example of methodology which has been developed to help a local authority in the identification of flood defence systems. It provides tools to characterize the protection with reference to the new regulation framework. It also highlights issues that are to be faced when applied on a complex territory, such as Troyes agglomeration in the North East of France.

# Thème 3

## Connaissance et modélisation des aléas naturels

### Comité scientifique

#### *Animateurs de la session orale :*

Patrick Soulat  
Vincent Rey

Safege  
Université de Toulon

#### *Relecteurs :*

Daniel Loudière (*Coordinateur*)  
Eric Chaumillon

SHF / CTPBOH  
Université de La Rochelle,  
UMR CNRS 7266 LIENSs  
Safege

Patrick Soulat



# Détermination du niveau de protection des systèmes d'endiguement en milieu maritime

## *Determination of level of protection of coastal dike system*

C. Trmal<sup>1</sup>, Y. Deniaud<sup>2</sup>,  
L. Cuvillier, P. Lebreton

<sup>1</sup> Cerema Méditerranée, Aix-en-Provence, [celine.trmal@cerema.fr](mailto:celine.trmal@cerema.fr)

<sup>2</sup> Cerema Eau, Mer et Fleuve, Brest, [yann.deniaud@cerema.fr](mailto:yann.deniaud@cerema.fr)

### Résumé

Les systèmes d'endiguement en milieu maritime, particulièrement lorsqu'ils sont en première ligne à la côte, sont soumis aux actions conjuguées de la houle, des niveaux marins et du vent. Ces actions hydrauliques sollicitant les ouvrages sont complexes car corrélées entre elles, notamment lorsque les fonds de l'avant-côte en amont de l'ouvrage sont faibles vis-à-vis des houles incidentes.

Dans le cadre réglementaire de la réalisation des études de dangers (EDD) maritimes, la définition du niveau de protection d'un système d'endiguement s'appuie à la fois sur la détermination des sollicitations marines auxquels ce dernier est confronté, mais également sur celle des franchissements admissibles, c'est-à-dire les entrées d'eau intermittentes que le système est en capacité de gérer sans mise en danger des ouvrages et des populations protégées. En effet, les premières entrées d'eau que les systèmes d'endiguement subissent, se produisent en général par franchissements de paquets de mer par-dessus un ou plusieurs tronçons, sauf en cas de présence de brèches ou d'ouvrages traversants.

Le raisonnement classique des études hydrauliques pour l'élaboration des plans de prévention des risques consiste à propager des actions hydrauliques d'une certaine probabilité conjointe d'occurrence, du large vers la côte, pour ensuite déterminer les franchissements générés. Or la mise en œuvre de cette approche pour la définition de niveau de protection conduit à multiplier les calculs pour tenir compte des nombreuses configurations de houles et de niveaux marins observés au large et susceptibles de produire le même effet à la côte. L'objet de la publication est donc de discuter d'une démarche de détermination du niveau de protection d'un système d'endiguement maritime qui inverse ce raisonnement et s'intéresse d'abord à la valeur des franchissements admissibles par le système, avant de relier celle-ci aux principales actions hydrauliques à l'origine du franchissement : la houle et le niveau marin, en pied d'ouvrage, mais aussi au large.

Cette publication présente et détaille ainsi une méthodologie générale pour la détermination du niveau de protection des systèmes d'endiguement situés en milieu

maritime et soumis à une attaque frontale de la houle conduisant à des franchissements par paquets de mer. Une discrimination sera réalisée suivant la profondeur relative des fonds de l'avant-côte en amont de l'ouvrage vis-à-vis des houles incidentes.

### **Abstract**

Coastal defence systems are exposed to the combined actions of waves, sea levels and winds, particularly when they are on the front line at the coast. These hydraulic actions are complex because they are correlated, especially when the foreshore at the structure is shallow compared to the height of incident waves.

In the French regulation framework for carrying out risk analysis on defence systems, the definition of the level of protection is based on the determination of both marine actions and the tolerable overtopping, *i.e.* the intermittent water inflows that the system can sustain without endangering the structure nor people in the protected area. It has been observed that the first water inlets that the defence systems undergo, usually occur by overtopping at one or more locations, except in the case of previous failure of the structure due to breaches or pipes crossing up and over.

The usual process of hydraulic studies for risk prevention plans is to propagate hydraulic actions of a certain joint occurrence probability, from offshore to the coast, and then to determine the overtopping generated. However, the utilization of this approach to the definition of protection level leads to the multiplication of calculations to take into account the collection of configurations in which waves and sea levels are combined to produce similar effect at the coast. The purpose of the publication is therefore to discuss a process of determining the level of protection of a coastal defence system that reverses this reasoning *i.e.* which first identifies the value of the tolerable overtopping by the system, then links it to the main hydraulic actions at the origin of the overtopping: waves and sea level, at the toe of the structure, but also offshore.

This publication presents and details a general methodology for the determination of the level of protection of coastal defence systems located at coastline and exposed to wave attacks leading to sea water overtopping. Discrimination will be carried out according to the relative depth of the foreshore of the structure in relation to the height of incident waves.

# **Aide à la surveillance des digues maritimes : les systèmes de vigilance submersion**

## ***Relations to help coastal dyke resistance forecast***

**A. Tardieu<sup>1</sup>, O. Barbet<sup>1</sup>,  
J. Berthelot<sup>1</sup>, B. Seurot<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ISL, [tardieu@isl.fr](mailto:tardieu@isl.fr), [barbet@isl.fr](mailto:barbet@isl.fr), [berthelot@isl.fr](mailto:berthelot@isl.fr), [seurot@isl.fr](mailto:seurot@isl.fr)

### **Résumé**

La réglementation sur les digues demande aux gestionnaires de définir des niveaux de protection et des seuils d'alerte des populations. Dans les faits, les gestionnaires de digues maritimes disposent simplement des alertes Météo-France (vigilance submersion jaune, orange ou rouge) pour organiser leur surveillance et celles-ci ne sont pas bien adaptées au contexte spécifique de chaque digue.

L'article présente plusieurs recherches menées pour affiner ces niveaux de vigilance sur des ouvrages particuliers. Il présente également un lien avec les données de prévision des sites <http://marée.info> et <http://data.shom>.

Il est entendu en préalable que la stabilité des ouvrages est acquise jusqu'au niveau de protection. L'objet est ensuite de définir les combinaisons de paramètres amenant à l'atteinte de ce niveau qui est matérialisé soit par un niveau statique (dans les cas d'aléa de surverse), soit par un débit dans les cas d'aléas de franchissement par paquets de mer.

Les paramètres principaux sont le coefficient de marée, le vent (direction et intensité), la houle au large.

La méthode consiste à modéliser de nombreuses situations en faisant varier ces trois paramètres et d'en tirer des relations simplifiées facilement utilisables.

Pour ce faire, il est nécessaire en premier lieu de déterminer le ou les paramètres déterminants. Par exemple en Manche, selon la localisation (Ouest ou Est) et la zone (abritée ou front de mer), chacun de ces trois paramètres est plus ou moins déterminant. Le coefficient de marée est systématiquement prépondérant mais à partir de coefficients différents (85 ou 100). La houle océanique est déterminante sur la côte Ouest en front de mer, alors que ce sont les surcotes, barométriques ou anémométriques qui sont déterminantes à l'Ouest dans les zones abritées et à l'Est.

Une fois acquise cette simplification des paramètres d'entrée, il est possible d'établir des abaques simplifiés. La figure 2 présente sur un site soumis à l'aléa de franchissement deux courbes de dépassement d'un niveau de protection (défini à un

franchissement supérieur à 5 l/s/ml) pour un état avant et après travaux d'aménagement. Le gestionnaire positionne en abscisse le niveau théorique de la marée et en ordonnée la vitesse moyenne du vent prévu. Il visualise alors s'il est probable ou non qu'il dépasse son niveau de protection défini par les courbes verte et orange. Les points bleus positionnés correspondent à des événements réels.

Ces abaques permettent de proposer des corrélations entre les données de prévision disponibles et les atteintes possibles aux ouvrages. Ils nécessitent des simplifications adaptées aux spécificités de chaque ouvrage et seraient à caler par chaque gestionnaire sur des événements réels.

Ils ont pour objet d'apporter aux gestionnaires des outils utiles et aisés à mettre en œuvre pour faciliter la surveillance de leurs digues.

### **Abstract**

French regulation requires to define operating instructions to assess risk management for dykes. In the managing of seadykes, managers use Météo-France alerts (yellow, orange or red submersion vigilance) to organize the planning emergency. But these forecast are not completely adapted to this function. The aim of the article is to give some over suggestion to assess risk management for sea dykes using simplified relations between settings (wind, sea level, wind set up, wave set up). A good understanding of each of this settings and how they interfere in a specific location is necessary. National forecast from <http://marée.info> or <http://data.shom> can also be used. These methods have to be extended end tested with real events to help the assessment of emergency risk in sea flooding.



# Mesures *in situ* d'impact de vague sur une digue composite

## *In-situ measurement of wave impact on a composite breakwater*

**P.A. Poncet<sup>1</sup>, S. Abadie<sup>1</sup>,  
B. Larroque<sup>2</sup>, B. Liquet<sup>2</sup>,  
D. Sous<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> UNIV PAU & PAYS ADOUR/ E2S UPPA, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Électrique –, EA4581, Fédération MIRA, Anglet 64600, [pa.poncet@univ-pau.fr](mailto:pa.poncet@univ-pau.fr)

<sup>2</sup> CNRS/UNIV PAU & PAYS ADOUR/E2S UPPA, Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications de Pau –, UMR5142, Fédération MIRA, Pau 64000

<sup>3</sup> MIO-USTV/AMU/CNRS/IRD, UM 110, Université du sud-Toulon-Var, La Garde

### Résumé

Afin d'étudier les pressions d'impact de vague *in situ*, la digue de l'Artha à Saint-Jean de Luz a été équipé de deux capteurs de pression disposés l'un au-dessus de l'autre sur le musoir ouest. Cette partie courbe de la digue est la plus exposée aux houles de nord-ouest particulièrement énergétiques dans le golf de Gascogne. Ces deux capteurs ont ainsi enregistré le signal de pression à 1 kHz par tranches de 10 minutes toutes les heures de janvier à avril 2016. Par ailleurs le champ de vagues au large est mesuré par une bouée directionnelle du réseau CANDHIS, le niveau d'eau est obtenu au marégraphe de Socoa et le vent est mesuré au sémaphore de Socoa.

Les conditions environnementales enregistrées pendant la campagne de mesure correspondent au climat typique d'un hiver dans le Golf de Gascogne. En particulier la hauteur significative moyenne était de 1.8m et la hauteur significative maximale de 7.6m. Les mesures de pression sont en accord avec des études similaires précédentes [1], [2], mettant en évidence des pics de pressions plus faibles que ceux obtenus en canal [3]. La structure de la digue est à l'origine de nombreux phénomènes complexes qui sont en général susceptibles de minimiser les impacts. En particulier les blocs qui protègent l'ouvrage maçonné provoque du déferlement.

Un des objectifs de cette étude est donc aussi d'identifier les conditions qui génèrent les impacts les plus destructeurs et en particulier l'influence du niveau d'eau. Une première analyse statistique du rôle des facteurs environnementaux ne révèle pas de phénomène inattendu. La hauteur de la houle est corrélée aux pressions pour les impacts contrôlés par l'hydrostatique mais ne permet pas de bien représenter certains impacts extrêmes. Une étude du signal de pression brut montre que la digue est soumise à différents types d'impact. La grande majorité des impacts sont lents et leurs intensités en partie contrôlée par la hauteur de vague. Mais des impacts intenses et rapides ont aussi été mesurés dans des conditions de houle et vent

relativement calme. L'intensité de ces impacts ne peut être expliquée uniquement par la pression hydrostatique. Certains impacts semblent correspondre à des impacts haute aération emprisonnant une poche d'air comme décrit dans [4]. Les pressions de ces impacts sont évaluées avec le modèle de [5]. La prochaine campagne de mesure qui emploiera plus d'une vingtaine de capteurs à très haute fréquence permettra peut-être de détecter plus d'impacts de ce type et de mieux comprendre leur dynamique.

## Abstract

In order to study *in situ* wave impact pressure on coastal structure the Artha breakwater was equipped by two high frequency sensors on its western extremity. Those sensors recorded pressure at 10 kHz for 10 minutes every hour from January 2016 to April 2016. During the same period offshore swell was measured by a directional wave buoy 1km from the breakwater while wind and water level were recorded at the semaphore and tide gauge of Socoa. Pressure measurement are in agreement with previous experiments [1],[2], showing peak pressure weaker than those measured in wave flumes [3]. The breakwater's armor unit is likely to generate complex effects which could minimise impacts. One of the aims of this study is to identify the environmental conditions (swell, water level and wind) that generate the strongest impacts. A first statistical analysis of the environmental datas confirmed the randomness of the phenomenon and no surprising trend was shown. Each impact were then studied individually and two types of impact were distinguished. The first and more numerous class present slow impacts which intensity stays relatively close to hydrostatic. The second class present faster and more intense impacts happening for relatively weak wave height. The potential compression effect of entrapped pockets of air is studied in order to explain those pressures. During the next measurement campaign 22 pressure sensor will be deployed on the breakwater allowing a better understanding of the phenomenon.

## Références

- [1] De Rouville A., Besson P., Petry P., (1938) *État actuel des études internationales sur les efforts dus aux lames*. Annales des Ponts et Chaussées VII.
- [2] Bullock G.N., Crawford A.R., Hewson P.J., Walkden M.J.A., Bird P.A.D. (2001). *The influence of air and scale on wave impact pressure* Coastal Engineering, Vol. 42(4), pp291-312 [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00065-X)
- [3] Hofland B., Kaminski M., Wolters G. (2011). *Large scale wave impacts on a vertical wall*. Coastal Engineering Proceedings, Vol 18(3), 15 p.
- [4] Bullock G.N., Oubrai C., Peregrine D.H., Bredmose H. (2007). *Violent breaking wave impacts. Part 1: Results from large-scale regular wave tests on vertical and sloping walls*. Coastal Engineering, Vol. 54(8), pp 602-617 <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.12.002>
- [5] Bagnold R., (1939). *Interim report on wave-pressure research*, J.Inst Civil Eng. 12: 201–226.

# **Développement d'Atlas de zones inondables et de modèles de propagation de débits, au service de la gestion des ouvrages en crue**

## *An atlas of flood-risk areas and a flood propagation model to improve the management of hydraulic works*

**B. Jacopin<sup>1</sup>, F. Mercier<sup>1</sup>,  
E. Andries<sup>1</sup>, Y. Beuren<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD), Mallemort,  
[bertrand.jacopin@smavd.org](mailto:bertrand.jacopin@smavd.org)

### **Résumé**

Le Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD) est engagé depuis plusieurs années dans une démarche de gestion du cours d'eau, au service des collectivités riveraines de la Durance entre Serre-Ponçon et le Rhône. Le SMAVD a entrepris le développement de modèles permettant d'évaluer l'emprise des zones inondables pour différents débits de crue, ainsi que d'un outil de propagation de crue simplifié.

L'intégralité de la Basse Durance est représentée par des modèles hydrauliques numériques développés en interne par le SMAVD. Ces modèles permettent d'évaluer la vulnérabilité des territoires face aux crues de la Durance et de quantifier les conséquences des défaillances du réseau d'ouvrages. Plusieurs scénarios de tenue des ouvrages sont considérés, en fonction du risque de défaillance des ouvrages dans leur état actuel (boisements, terriers, érodabilité).

Ces simulations numériques sont réalisées pour des crues de période de retour de 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans. Les résultats obtenus sont regroupés au sein d'Atlas de Zones Inondables (AZI). Ces AZI sont élaborés dans le cadre d'une concertation entre les acteurs locaux, les services de secours et les utilisateurs identifiés. Référentiel précieux pour la gestion des ouvrages en crue, les AZI recensent également des informations utiles aux services de secours (hauteurs d'eau, routes impactées).

En période de crue, le SMAVD assure une veille hydrologique, en partenariat avec le SPC, EDF et Météo France. Le SMAVD a ainsi développé un modèle simplifié expert permettant d'anticiper l'amplitude et la temporalité des débits de la Durance. Les membres du SMAVD sont avertis plusieurs heures à l'avance des débits à attendre, de la nécessité éventuelle de la mise en action de leurs Plan Communaux de Sauvegarde (PCS), et peuvent alors se référer aux AZI correspondants.

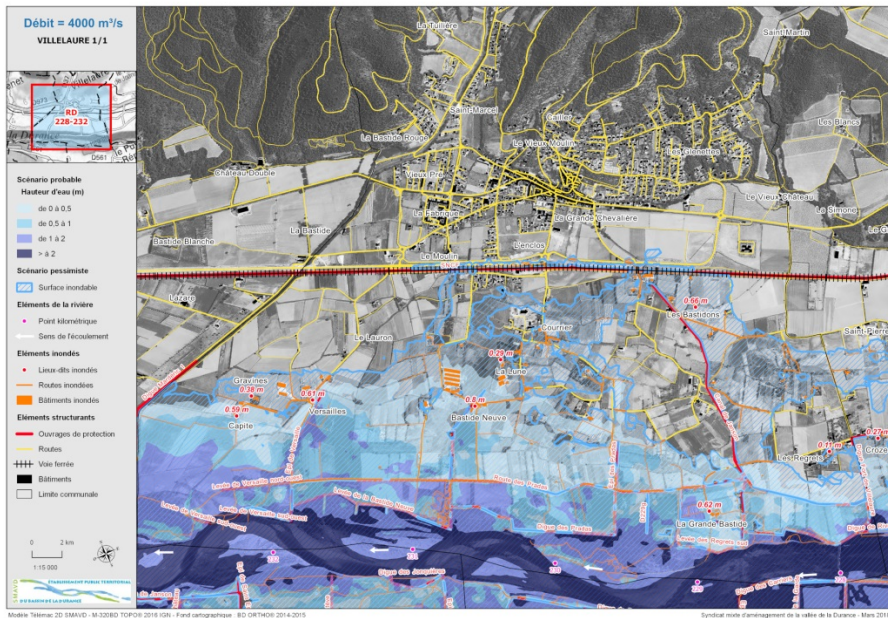


FIGURE 1: EXTRAIT DE L'ATLAS DYNAMIQUE DES ZONES INONDABLE DE LA COMMUNE DE VILLELAURE

## Abstract

The numerical hydraulic models developed by the SMAVD allow to estimate the vulnerability of territories towards the Durance floods and to quantify the consequences of hydraulic works failures. Indeed, several behavior scenarios of the existing hydraulic works are considered, according to their current condition (afforestation, erosion...).

Return period of floods of 5, 10, 20, 30, 50 and 100 years are considered for the numerical models. The results are gathered in an Atlas of Flood-risk areas (AZI). This AZI is then finalized after an important dialogue phase between local actors of the concerned areas, emergency services and identified users. Precious reference tool for the management of the hydraulic works during flood, the AZI also list useful information for an operational projection of emergency services (maximal heights of water in the strategic areas, roads or impacted ways).

During flood periods, the SMAVD ensures the hydrological watch, in partnership with the SPC, EDF and Météo France.

The SMAVD has also developed a simplified expert model which enables the anticipation of amplitude and temporality of Durance flow during a flood. Members of SMAVD are warned several hours in advance of incurred risks, and can refer themselves to the corresponding AZI.

# **Projet de R&D DIGUE 2020 : réalisation d'une plateforme de recherche en site maritime pour l'étude des actions de la mer sur les digues, la durabilité, et la perception du risque de submersion**

## ***DIGUE 2020 project: construction of a research platform in marine environment to study the impact of the sea on dikes, the durability and the perception of the risk of submersion***

**T. Faisant<sup>1</sup>, L. Peyras<sup>1</sup>,  
C. Jeanniot<sup>1</sup>, A. Tekatlian<sup>2</sup>, S. Gendrey<sup>2</sup>, C. Chevalier<sup>3</sup>,  
M. De Baecque<sup>3</sup>, A. Schleyer-Lindenmann<sup>4</sup>, R. Bertoldo<sup>4</sup>,  
C. De Paris<sup>5</sup>, T. Mallet<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Irstea, Aix-en-Provence, [thibaut.faisant@irstea.fr](mailto:thibaut.faisant@irstea.fr)

<sup>2</sup> Cerema, Aix-en-Provence, [annick.tekatlian@cerema.fr](mailto:annick.tekatlian@cerema.fr)

<sup>3</sup> IFSTTAR, Salon de Provence, [christophe.chevalier@ifsttar.fr](mailto:christophe.chevalier@ifsttar.fr)

<sup>4</sup> ESPACE, Aix-en-Provence, [alexandra.lindenmann@univ-amu.fr](mailto:alexandra.lindenmann@univ-amu.fr)

<sup>5</sup> SYMADREM, Arles, [celine.deparis@symadrem.fr](mailto:celine.deparis@symadrem.fr)

### **Résumé**

Les ouvrages de protection contre la houle ou contre les submersions couvrent 17 % des côtes françaises, soit 1 210 km. Compte tenu du changement climatique, notamment l'élévation du niveau de la mer, et de la présence démographique importante, les enjeux sur le littoral sont considérables. Dans ce contexte, le projet de recherche collaborative DIGUE 2020 a été conçu afin de permettre une meilleure maîtrise du risque de submersion marine. Le projet DIGUE 2020 vise à construire, en Région Sud Provence Alpes Côte d'Azur, une plateforme de recherche sur les digues maritimes en y associant, en parallèle, les travaux de trois thèses et d'un post-doc traitant des thématiques suivantes :

- réaliser une plateforme de recherche en utilisant un concept innovant de réalisation de digue en sol-chaux en milieu marin,
- quantifier les effets de l'action de la mer sur les digues de protection,
- quantifier la durabilité du matériau des digues en sol-chaux en milieu marin,

- évaluer la perception du risque de submersion marine.

Le site d'implantation de la plateforme a été identifié. La conception de l'ouvrage a débuté en Juillet 2018 et sa construction est prévue pour début 2019. En parallèle, de la réalisation de l'ouvrage, trois thèses sont en cours sur des thématiques scientifiques concernant l'auscultation de l'ouvrage et la durabilité de ses matériaux constitutifs, en particulier le comportement du sol-chaux en milieu marin. Le projet comporte également un volet sciences humaines, au travers du travail d'un post-doc associé au projet. Il s'agit notamment de réaliser une enquête psycho-sociale auprès de populations sur la thématique du risque de submersion.

Les connaissances développées et partagées au moyen des travaux de recherche et de la plateforme envisagée ont pour objectif, à moyen terme, le développement de projets de confortement ou d'élaboration de nouvelles digues d'une conception durable. Sur le long terme, le projet DIGUE 2020 a pour vocation d'être reproduit sur d'autres sites maritimes régionaux, français, mais aussi européens et internationaux compte tenu des résultats attendus qui ont une portée au-delà de la Région Sud PACA. L'objectif étant également de développer une culture commune sur le risque de submersion marine basée sur une réelle approche interdisciplinaire alliant sciences techniques et science humaines, en lien avec les actions de recherches qui seront menées sur la plateforme.

### **Abstract**

In France, protective structures against submersion cover 17% of the coastline. Given the effects of climate change, in particular the elevation of the sea level and the demographic pressure, the French coastline must deal with significant stakes. In this context, DIGUE 2020 project was created to respond to the following issues:

- plan and build a research platform to develop a new concept for construction of dikes by using materials treated with lime,
- quantify the consequences of sea solicitations on the platform,
- quantify the durability of materials which compose the platform,
- assess the perception of the risk of marine submersion by populations.

Knowledges developed through this project can be used for future strengthening works on embankments or for elaborate a new kind of dikes, more sustainable. The aim of this publication is to provide a first feedback in relation to the actions carried out through this project.

# **Impact de brise-lames détachés poreux émergents sur l'énergie de la houle à la côte**

## ***Impact of emerging porous detached breakwaters on the coastal wave energy***

**G. Arnaud<sup>1</sup>, V. Rey<sup>1</sup>, J. Touboul<sup>1</sup>, D. Sous<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Mediterranean Institute of Oceanography, Université de Toulon,  
[gwendoline.arnaud@univ-tln.fr](mailto:gwendoline.arnaud@univ-tln.fr)

### **Résumé**

Les brise-lames détachés sont une solution largement utilisée pour l'aménagement et la protection des plages. Disposés régulièrement le long de la côte, ils constituent des barrières à la propagation de la houle, et atténuent son impact à la côte par réflexion et diffraction entre deux ouvrages successifs, grâce à un choix adéquat de la taille des ouvrages et de leur espacement. La zone abritée par le brise-lame est souvent comblée avec du sable, formant un tombolo. Les ouvrages poreux sont de plus en plus considérés, présentant d'un point de vue environnemental les avantages de favoriser le développement de la biodiversité et de maintenir une circulation des masses d'eau pour une meilleure qualité de l'eau.

Le travail présenté ici consiste en l'étude d'un brise-lame poreux, constitué d'un réseau dense de cylindres verticaux émergents. Des expériences sur l'hydrodynamique ont été menées en 3D dans le bassin d'essai de SeaTech (cf. Figure 1), elles sont comparées à des modèles numériques basés sur des formulations intégrales pour les potentiels des vitesses. La symétrie du système expérimental permet de considérer le cas d'étude comme celui d'un ensemble de brise-lames régulièrement espacés le long de la côte. L'étude propose une analyse des processus de réflexion et réfraction-diffraction en fonction de l'espacement entre deux structures successives et leurs largeurs.

Du fait de la porosité du brise-lame, une partie de la houle continue à se propager avec dissipation à travers la structure, modifiant significativement les conditions d'agitation à l'abri de la structure. L'énergie de la houle est plus homogène le long de la côte, la diffraction, moins importante, étant compensée par un flux à travers la structure. Pour certaines conditions de houle, des interférences peuvent apparaître non seulement en fonction de la distance entre deux brise-lames successifs, comme pour les ouvrages imperméables classiques, mais aussi au niveau de la structure poreuse, augmentant la dissipation de l'énergie des vagues.



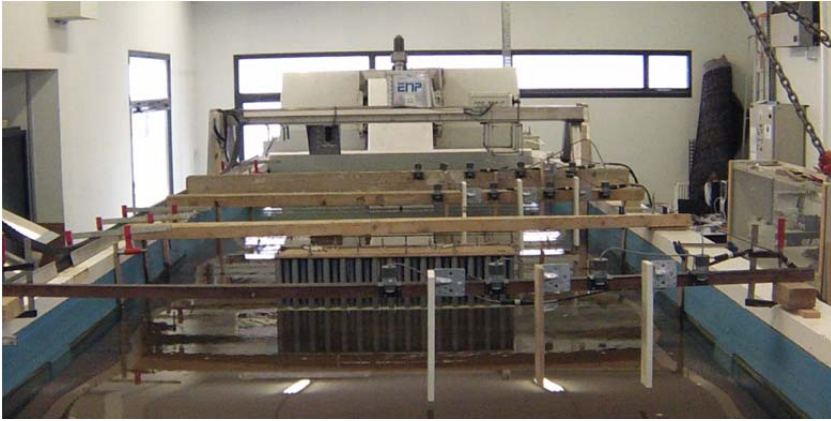


FIGURE 1: PHOTOGRAPHIE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### **Abstract**

Detached breakwaters are a classical solution for beach management and protection. When they are regularly disposed along the coast, they constitute barriers to wave propagation, and attenuate wave effects on the coast by reflection and diffraction between two successive structures, thanks to a suitable choice of the size of the structures and their spacing. The area sheltered by the breakwater is often filled with sand, forming a tombolo. Porous structures are increasingly considered, presenting from an environmental point of view the advantages of promoting the development of biodiversity and maintaining a circulation of water bodies for better water quality. The work presented here is dedicated to the study of a porous breakwater, consisting of a dense array of emergent vertical cylinders. Experiments about hydrodynamic were carried out in 3D in the SeaTech test basin, and compared to numerical models based on integral formulations of velocity potentials. The symmetry associated with the basin width allows to consider the study case as that of a set of regularly spaced breakwaters along the coast.

Due to the porosity of the breakwater, part of the waves continues to propagate with dissipation through the structure, changing significantly the agitation conditions downwave the structure. The wave energy is more homogeneous along the coast, the diffraction, less important, being compensated by a flow through the structure. For particular wave conditions, interference may occur not only depending on the distance between two successive breakwaters, as for conventional impervious structures, but also on the porous structure, increasing the dissipation wave energy.



# Thème 4

## Connaissance et modélisation des modes de rupture, des mécanismes et scénarios de défaillance des ouvrages et des systèmes

### Comité scientifique

#### *Animateurs de la session orale :*

Fabien Anselmet

IRPHE / CNRS

Pierre Breul

Université de Clermont-Ferrand

#### *Relecteurs :*

Fabien Anselmet (*Coordinateur*)

IRPHE / CNRS

Pierre Breul

Université de Clermont-Ferrand

Laurent Peyras

Irstea Aix-en-Provence

Vincent Rey

Université de Toulon



# **Caractérisation expérimentale du comportement mécanique des sols pulvérulents érodés par suffusion**

## ***Experimental characterization of the mechanical behavior in graded cohesionless soils eroded by suffusion***

**C.D. Nguyen<sup>1</sup>, N. Benahmed<sup>2</sup>, P. Philippe<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> IRSTEA, Unité de Recherche RECOVER, Aix-en-Provence  
[doan.nguyen@irstea.fr](mailto:doan.nguyen@irstea.fr), [nadia.benahmed@irstea.fr](mailto:nadia.benahmed@irstea.fr), [pierre.philippe@irstea.fr](mailto:pierre.philippe@irstea.fr)

### **Résumé**

L'érosion interne est un mécanisme qui apparaît dans les ouvrages hydrauliques en terre. Elle est définie comme l'arrachement et le transport de particules sous l'action d'un écoulement hydraulique souterrain au sein d'un massif de sol. C'est un processus interne au sol et invisible de l'extérieur jusqu'à ce que les dégradations deviennent suffisantes pour générer des signes discernables en surface comme des tassements ou une augmentation du débit des fuites dans le cas d'une digue. Cette érosion interne est alors susceptible de s'accélérer et de mener l'ouvrage à la rupture. Le phénomène spécifique d'une érosion par suffusion correspond au cas où seules les particules fines sont arrachées et transportées à travers le squelette formé majoritairement par les grains les plus grossiers. L'apparition de la suffusion entraîne souvent une modification de la microstructure initiale, et par conséquent, des caractéristiques physiques et hydrauliques des sols concernés. Ces modifications entraînent à leur tour des conséquences sur le comportement mécanique. Cependant, la prédiction de la réponse mécanique d'un sol érodé par suffusion reste une question ouverte du fait d'une microstructure complexe et difficile à modéliser de par le changement des propriétés physiques du sol (quantification et variation de la distribution spatiale) et de l'apparition de nombreuses hétérogénéités.

Dans cet article, le travail expérimental présenté s'articule autour d'essais de suffusion et d'essais de compression triaxiale en conditions drainées et non drainées sur des échantillons non érodés et érodés afin de mettre en évidence l'effet de la suffusion sur les propriétés de résistance au cisaillement du matériau. Une approche originale permettant de prédire la réponse des sols érodés par suffusion du point de vue mécanique est proposée.

## **Abstract**

Internal erosion is a mechanism that appears in earthen hydraulic structures. It is defined as the detachment and transport of soil particles under an underground hydraulic flow within a soil. It is an internal process which is undetectable from the outside until the degradations become sufficient to generate discernable signs like settlements or an increase in the leakage flow such in the case of a dike for example. This internal erosion is then likely to accelerate and to lead to the hydraulic works failure. The specific phenomenon of suffusion corresponds to the case where the fine particles are detached and transported by seepage through the skeleton formed mainly by the coarser grains. The appearance of suffusion often results in a modification of the initial microstructure of soil, and consequently, of its physical and hydraulic characteristics. These modifications, in turn, lead to consequences on the soil mechanical behavior. Nevertheless, the prediction of the mechanical response of an eroded soil by suffusion remains an open question because of a resulted microstructure that is not easy to model owing to the difficulty in assessing the change of the soil physical properties (quantification and the spatial distribution) and of the appearance of heterogeneities.

In this paper, the presented experimental work is based on suffusion tests and triaxial compression tests under drained and undrained conditions on un-eroded and eroded samples to highlight the effect of suffusion on shear strength properties of the material. An original approach to predict the mechanical response of eroded soils is proposed.

# Sensibilité à la suffusion, de l'échantillon à l'ouvrage

## *Suffusion susceptibility, from the specimen to the earth structure*

D. Marot<sup>1</sup>, F. Bendahmane<sup>1</sup>,  
R. Gelet<sup>1</sup>, V.T. Le<sup>1,2</sup>, L. Zhang<sup>1</sup>, C. Zhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Nantes, Institut GeM (UMR CNRS 6183), Saint-Nazaire,  
[didier.marot@univ-nantes.fr](mailto:didier.marot@univ-nantes.fr)

<sup>2</sup> The University of Danang -University of Science and Technology 54, Nguyen  
Luong Bang, Da Nang, Vietnam

### Résumé

La surverse et l'érosion interne apparaissent comme les deux principales causes de la rupture des digues et barrages en remblais. Quatre processus d'érosion interne peuvent être distingués : l'érosion de conduit, l'érosion régressive, l'érosion de contact et la suffusion. Cette étude porte sur la suffusion qui mobilise la fraction fine du sol. En considérant uniquement la distribution granulométrique et éventuellement la densité du sol, de nombreux critères granulométriques ont été proposés dans la littérature. Toutefois la suffusion étant une interaction fluide-solide, il convient évidemment de prendre aussi en compte la sollicitation hydraulique. Par ailleurs, la filtration de certaines particules détachées lors de la suffusion peut induire un colmatage du milieu poreux et donc une variation de la pression interstitielle et du débit d'écoulement. En conséquence, la sollicitation hydraulique est modélisée par la puissance dissipée par le fluide, qui s'exprime comme le produit du débit volumique de l'écoulement, du poids volumique de l'eau et de la différence de charge hydraulique. Lorsque la conductivité hydraulique se stabilise et que le taux d'érosion décroît, la masse érodée cumulée et l'énergie totale dissipée sont déterminées et à partir de ces deux grandeurs, l'indice de résistance à la suffusion est calculé. Grâce à cette approche et aux résultats d'essais sur différents types de sols, six catégories de sensibilité à la suffusion ont été proposées.

Les différentes campagnes de caractérisation expérimentale de la suffusion décrites dans la littérature, ont été menées sur des échantillons de tailles très diverses et différents historiques de chargement hydraulique qui peuvent être très différents des conditions de sollicitation *in situ*. Enfin les essais de suffusion ont été très majoritairement réalisés sous écoulement vertical alors que sur site, la direction de l'écoulement peut être bien différente.

Dans ce contexte, le premier objectif de l'étude menée est de s'assurer que la caractérisation de la sensibilité à la suffusion n'est pas significativement affectée par : la longueur de l'écoulement, l'historique de chargement hydraulique et la direction de l'écoulement. Suivant cet objectif, trois des six prototypes développés

au sein de notre équipe de recherche pour caractériser différents processus d'érosion sont utilisés : l'érodimètre triaxial, l'oedoperméamètre et l'érodimètre multidirectionnel. L'influence de la taille des échantillons, de l'historique de chargement et de la direction de l'écoulement étant très limitée, l'approche basée sur l'indice de résistance à la suffusion est adaptée pour étudier, à l'échelle d'un ouvrage réel, la sensibilité des sols qui le constituent.

A cause de la diversité des sols qui constituent les ouvrages hydrauliques et leurs fondations et de l'importance du linéaire de ces ouvrages, la sensibilité à la suffusion à l'échelle d'un ouvrage est extrêmement variable. Le deuxième objectif de l'étude est donc d'estimer à partir de paramètres physiques aisément mesurables, la sensibilité des sols à la suffusion. L'analyse statistique réalisée a permis d'aboutir à l'estimation de l'indice de résistance à la suffusion en fonction : du poids volumique sec, de la distribution granulométrique, de la valeur au bleu de méthylène et de l'angle de frottement interne.

Enfin le troisième objectif est d'identifier les zones les plus sensibles d'un ouvrage. Une étude de cas est donc menée en estimant l'indice de résistance à la suffusion du sol constituant chaque couche du noyau du barrage étudié et en calculant la puissance de l'écoulement pour chacune de ces couches. La confrontation de ces deux grandeurs permet d'identifier les couches les plus sensibles à la suffusion.

### **Abstract**

Overtopping and internal erosion appear as the two main causes of failure for dikes and earth dams. Four processes of internal erosion can be distinguished and this study deals with suffusion which mobilizes the fine fraction of soil. By considering solely the grain size distribution and possibly the soil density, many criteria were proposed in literature. However, suffusion is an interaction between fluid and solid and of course, the hydraulic loading has to be considered. Moreover, the filtration of some detached particles can induce a clogging of the porous medium followed by a variation of the interstitial pressure and the seepage flow. In consequence, the hydraulic loading is modeled by the power expended by the interstitial fluid.

The different experimental campaigns dedicated to the suffusion characterization and described in literature were performed with different sample sizes and under different histories of hydraulic loading, which can be very different in comparison with in-site conditions. Furthermore, most suffusion tests were performed under vertical flow, whereas in-site flow direction may be horizontal. The first objective of this work is to verify that suffusion susceptibility characterization is not significantly influenced by spatial and time scale effects. Because of soil heterogeneities within earth structures and their foundations and owing to their large size, suffusion susceptibility can considerably vary at the structure scale. The second objective is then to estimate the suffusion susceptibility from easily measurable parameters. Finally, the third objective is to identify the most sensible zones in a structure by comparing soil susceptibility and spatial distribution of flow power.

# **Durabilité d'un sol traité à la chaux en environnement maritime : méthodologie de l'étude et premiers résultats**

## ***Durability of lime treated soil in marine environment: methodology for a laboratory study and first result***

**M. De Baecque<sup>1</sup>, C. Chevalier<sup>1</sup>, M. Le Feuvre<sup>1</sup>, S. Palma Lopes<sup>1</sup>,  
P. Reiffsteck<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> IFSTTAR, GERS, Marne-la-vallée, Bouguenais & Salon de Provence, France

### **Résumé**

Le traitement des sols à la chaux est une technique éprouvée et répandue dans le domaine des terrassements routiers pour les propriétés de portance et de praticabilité des sols traités. Dans le domaine des ouvrages hydrauliques en terre, son utilisation est encore dans une phase exploratoire. Les attentes liées au traitement sont l'amélioration des propriétés mécaniques des sols initialement inaptes à l'utilisation pour des digues, et l'augmentation de la résistance à l'érosion interne et externe. Les interrogations portent sur la fiabilité au long terme de cette technique pour des ouvrages soumis à une variation temporelle des contraintes hydrauliques. Dans le cas des digues de protection contre les submersions marines, l'effet de la salinité de l'eau pose question quant à ses conséquences sur les propriétés d'un sol traité à la chaux à court et long terme.

À l'échelle du laboratoire, l'enjeu est de reproduire et d'accélérer les sollicitations naturelles et climatiques s'exerçant sur une digue maritime pour étudier de manière représentative mais dans un délai restreint la durabilité du matériau traité à la chaux. La salinité et les alternances immersions-émersions sont deux sollicitations majeures susceptibles de détériorer les propriétés initiales d'un matériau. Il est donc proposé d'évaluer la vitesse d'évolution des propriétés du matériau traité soumis à des variations cycliques d'hygrométrie et à l'exposition à l'eau de mer.

En dehors de toutes sollicitations les propriétés initiales du matériau traité à la chaux dépendent de la nature du sol, de la quantité de chaux, du mode de compactage, de la densité et de la durée de la cure. Dans cette étude, un unique sol est utilisé pour la préparation des mélanges. Il est traité à 0 %, 1 % ou 2 % de chaux et compacté à 98 % de l'optimum Proctor normal (OPN) ou 95 % de l'OPN. L'influence de ces paramètres de préparation sur la durabilité du matériau est étudiée.

Les propriétés suivies à l'état initial et après imposition de cycles hydriques sont :

- la résistance mécanique en compression (Rc) ;
- la résistance à l'érosion interne avec l'essai de trou (Hole Erosion Test) ;
- la résistance à l'érosion externe avec l'essai à l'érodimètre à jets mobiles (MoJET) ;
- la répartition de la porosité du matériau par des essais de porosimétrie à intrusion au mercure ;
- la résistivité électrique du matériau par des méthodes non destructives.

L'étude est actuellement toujours en cours mais les premiers résultats montre que :

- la résistance en compression simple (Rc) augmente avec le temps de cure pour un dosage en chaux de 2 %,
- la Rc chute après deux expositions à l'eau de mer puis se stabilise pour un traitement à 2 % de chaux,
- la durabilité du matériau au regard du paramètre Rc est plus grande lorsque l'eau de mer est introduite dans le matériau dès sa confection.
- le développement des composés cimentaires peut être suivi par la mesure de la résistivité électrique du matériau
- les deux premiers cycles hydriques de séchage et humidification entraînent une modification de la répartition de la taille des pores mais pas la porosité totale du matériau.

Les essais d'érosion sont en cours d'interprétation et seront présentés lors de la conférence Digue2019.

Le vieillissement au laboratoire présente des limites en termes de représentativité des conditions climatiques réelles. Dans le cadre du projet CPER-FEDER PACA Digue 2020 une plateforme maritime expérimentale en sol traité à la chaux sera construite en Mars 2019. Les propriétés du matériau *in situ* seront étudiées à plusieurs moments de la vie de l'ouvrage et comparées à celle du matériau étudié au laboratoire.

### **Short abstract**

In order to study the lime-treated soil durability in marine environment, a method of accelerated aging is proposed. It reproduces the environmental stress applied on a marine dike. Mechanical properties, microstructural properties and resistance to erosion are parameters followed on lab samples during the aging. Destructive tests and geophysical test are performed.



# Évaluer l'impact du vieillissement des digues sur les mécanismes et scénarios de rupture

## *Impact estimation of aging process on levee breaching mechanisms and scenarios*

Y. Boussafir<sup>1</sup>, R. Tourment<sup>2</sup>, G. Veylon<sup>2</sup>, E. Durand<sup>3</sup>,  
L. Saussaye<sup>3</sup>, P. Reiffsteck<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ifsttar, Marne-la-Vallée, [yasmina.boussafir@ifsttar.fr](mailto:yasmina.boussafir@ifsttar.fr) et [philippe.reiffsteck@ifsttar.fr](mailto:philippe.reiffsteck@ifsttar.fr)

<sup>2</sup> Irstea, Aix-en-Provence, [remy.tourment@irstea.fr](mailto:remy.tourment@irstea.fr) et [guillaume.veylon@irstea.fr](mailto:guillaume.veylon@irstea.fr)

<sup>3</sup> Cerema, Blois, [edouard.durand@cerema.fr](mailto:edouard.durand@cerema.fr) et [lucile.saussaye@cerema.fr](mailto:lucile.saussaye@cerema.fr)

### Résumé

L'étude du vieillissement des matériaux naturels est un domaine d'étude relativement récent. Peu de travaux permettent de quantifier l'impact de la dégradation des performances en lien avec les conditions d'environnement qui entourent l'ouvrage lorsqu'il s'agit d'ouvrage en terre ni d'en préciser la cinétique, ce qui est le cœur du sujet de la durabilité.

Dans les scénarios de rupture des digues, en plus d'identifier les mécanismes de rupture, il est également important de connaître les propriétés des matériaux qui constituent l'ouvrage et d'en déterminer leur valeur caractéristique. Les dernières publications ont pointé le fait que tant la performance de la fonction que les propriétés des matériaux, ne sont pas invariables dans le temps mais qu'elles évoluent à des rythmes plus ou moins rapides dans le temps.

La dégradation conduit à une diminution des propriétés des composants de la levée et par la même à une diminution de la fonction jouée par les composants au sein de l'ouvrage. A l'origine des mécanismes de dégradation des processus physiques, chimiques ou naturels qui se développent tout au long de la vie de l'ouvrage en lien avec l'environnement de l'ouvrage. L'évidence du développement d'un mécanisme de dégradation est souvent constatée par un défaut visible lors des inspections comme des fissures de dessiccation, des terriers d'animaux. Le défaut est l'aboutissement du processus de dégradation et lorsqu'il est détecté, rend très probable le risque de défaillance par développement d'un mécanisme de rupture.

Nous proposons de regrouper les mécanismes de dégradation en trois grandes familles (puis plusieurs sous-familles) : (1) Effets de la météorologie, (2) Interaction avec le vivant, (3) Interaction avec les mouvements d'eau.

Le mécanisme de dégradation par dessiccation est plus particulièrement détaillé dans cet article. Pour cela il a été supposé que ce mécanisme était gouverné par des modifications de la teneur en eau et de la texture du sol en lien avec des alternances

de séchage et d'humidification. Des cycles d'humidification et de séchage ont donc été imposés sur deux séries d'éprouvettes de sols en provenance de la digue de La Ville-aux-Dames compactés statiquement à des teneurs en eau côté humide du Proctor Normal. Cela a permis d'évaluer l'impact du mécanisme de dégradation par dessiccation sur une performance mesurable en laboratoire : la conductivité hydraulique, mesurée après 0, 1, 3, 6 et 9 cycles de séchage et d'humidification avec des essais de perméabilité réalisés à l'appareil triaxial à charge constante.

Les résultats ont montré (à ce stade de l'étude) que la perméabilité est affectée par les cycles hydriques et qu'au bout de 3 cycles, la perméabilité augmente d'une puissance de 10 en passant de  $10^{-8}$  à  $10^{-7}$  m/s sur ce limon sableux classé B5.

Une réflexion sur les environnements météorologiques susceptibles de correspondre à ces types de sollicitation a permis de faire émerger une proposition de cartographie de zones géographiques classées V0 à V3, V0 correspondant aux secteurs ayant le moins d'impact pour le mécanisme et sur la performance, V3 à l'inverse correspondant aux secteurs ayant le plus d'impact sur le mécanisme dès lors que le sol y est sensible.

On peut supposer que dans les zones géographiques de forts écarts hydriques (par exemple près de la Rochelle ou dans la région PACA), le mécanisme de dégradation par dessiccation aura une intensité très forte et sera donc rapidement perceptible. Dans une région de faible écart hydrique, comme par exemple vers Belfort, les ouvrages subiront un mécanisme de dégradation par dessiccation très atténué ou extrêmement long à se développer.

La perméabilité pourrait d'un ouvrage neuf pourrait donc plus ou moins rapidement évoluer, au moins sur la partie de l'ouvrage en interaction avec l'atmosphère sous la surface de l'ouvrage, en talus ou sous la plateforme.

L'analyse de la durabilité de la digue peut être conduite en améliorant notre connaissance du processus de vieillissement en fonction de l'intensité des évènements et des types de matériaux concernés. De nombreux travaux doivent encore permettre de confirmer ces hypothèses, notamment au regard des types de matériaux concernés, de leurs propriétés initiales et de la confirmation des secteurs géographiques grâce notamment à du monitoring *in situ* qui pourrait aider à mieux quantifier les interactions sol-atmosphère.

## Abstract

The performance of a material or a function is the result of initial condition and their evolution in time, what is called deterioration process and the result of aging. It appears that the deterioration process of natural material is not very well known. We propose a classification of degradation mechanism that can affect the properties of natural properties. The article focus on the effect of aging by desiccation of a compacted sample of silty soil (from La Ville-aux-Dames, France) deteriorated with cyclic wetting and drying events supposed to represent the climatic environment with alternative wet and dry seasons in one year. It appears that these cycles increase the initial hydraulic conductivity and is a first result allowing us to discuss the quickness (fast, low, very low process) and the intensity (intense, intermediate or small process) of the deterioration processes by desiccation. This deterioration process depends on the geographic localization of the levee.

# **Modèle d'évaluation de la performance des digues soumises à la présence de végétation arborescente Cas de l'érosion interne**

## ***Performance assessment models for dikes subjected to the presence of woody vegetation – case of internal erosion***

**G. Bambara<sup>1</sup>, C. Curt<sup>1</sup>,  
P. Mériaux<sup>1</sup>, L. Peyras<sup>1</sup>,  
R. Tourment<sup>1</sup>, M. Vennetier<sup>1</sup>, P. Vanloot<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Irstea, Aix-en-Provence, [gisele.bambara@irstea.fr](mailto:gisele.bambara@irstea.fr)

<sup>2</sup> Laboratoire LISA-METICA, AMU, Marseille, [pierre.vanloot@univ-amu.fr](mailto:pierre.vanloot@univ-amu.fr)

### **Résumé**

Plusieurs milliers de digues sont présentes dans le monde, certaines construites depuis plusieurs siècles. La rupture de ces ouvrages peut avoir des conséquences économiques et humaines dramatiques, d'autant plus traumatisantes qu'ils sont censés protéger les populations contre les inondations. Les États ont ainsi mis en place des lois et règlements obligeant à évaluer et contrôler la sécurité des ouvrages hydrauliques comme en France. Or, les nombreux événements à l'instar des inondations de la Nouvelle Orléans aux USA lors de l'ouragan Katrina en 2005, dans l'Ouest de la France au cours de la tempête Xynthia en 2010 ou encore en 1993, 1994, 2002 et 2003 en Camargue et de 1999 et 2014 en Languedoc-Roussillon - témoignent de l'intérêt d'améliorer leur performance et donc leur sécurité.

Des travaux de recherche antérieurs ont permis de développer des modèles d'évaluation de la performance des digues fluviales à l'aide de modèles à base de connaissances. Ces modèles ont une structure hiérarchique à trois niveaux. L'indicateur de performance vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration donnée est la sortie du modèle. Il est obtenu par agrégation de critères eux-mêmes évalués à partir d'indicateurs qui sont ainsi les entrées du modèle. Ces modèles présentent deux limites :

- Les indicateurs ne sont pas formalisés ce qui peut créer des problèmes de répétabilité ou de reproductibilité de l'évaluation ;
- Ces modèles traitent essentiellement les facteurs « techniques » c'est-à-dire hydrauliques, géotechniques, géométriques de l'ouvrage et très partiellement

les facteurs biologiques générés par l'action d'organismes vivants. Or, une végétation arborescente très abondante peut notamment être constatée. Cette végétation peut mener à des mécanismes de dégradation à court, moyen et long termes notamment d'érosion interne. Une coupe des arbres n'est pas la solution car la présence de racines mortes peut entraîner une initiation ou une aggravation des mécanismes de dégradation.

Partant des travaux précédents, l'article présente des modèles d'évaluation de la performance des digues potentiellement impactées par de la végétation arborescente vis-à-vis de l'érosion interne. Ils améliorent les modèles initiaux en proposant une formalisation pour les différents indicateurs utilisés dans l'évaluation, y compris en l'absence de végétation sur les ouvrages. Ils prennent en compte la possible présence d'arbres et plus particulièrement de racines dans les différentes parties de l'ouvrage (remblai, fondation, interface remblai-fondation).

### **Abstract**

There are several thousand dikes in the world, some built several centuries ago. The failure of these structures can have dramatic economic and human consequences, all the more traumatic as they are supposed to protect populations against flooding. The States have thus put in place laws and regulations requiring the safety of hydraulic structures to be assessed and monitored, as in France. However, even today, the numerous catastrophic events testify to the interest of improving their performance and therefore their safety. Previous research has developed models for assessing the performance of river dykes using knowledge-based models. These models have a three-level hierarchical structure. The performance indicator for a given deterioration mechanism is the output of the model. It is obtained by aggregating criteria themselves evaluated from indicators which are thus the inputs of the model. These models have two limitations: the indicators are not formalized, which can create problems of repeatability or reproducibility of the evaluation; these models essentially deal with the "technical" factors, *i.e.* hydraulic, geotechnical, geometric factors of the structure and very partially the biological factors generated by the action of living organisms. However, tree vegetation can lead to short, medium and long-term degradation mechanisms such as internal erosion.

The article presents models for evaluating the performance of dikes potentially impacted by tree vegetation with respect to internal erosion. They improve the initial models by proposing formalization for the various indicators used in the evaluation.

# Essais de surverse *in situ* et quantification de la résistance à l'érosion

## *In situ overflow tests and quantification of erosion resistance*

**S. Bonelli, S. Nicaise,  
G. Charrier, N. Chaouch,  
F. Byron, Y. Gremeaux**

Irstea, Aix-en-Provence, [stephane.bonelli@irstea.fr](mailto:stephane.bonelli@irstea.fr)

### Résumé

La rupture d'une digue fluviale suite à une crue dépassant la crête de l'ouvrage constitue un scénario de l'étude de dangers. Il est capital de quantifier la résistance à la surverse. Lorsque le tronçon est équipé d'une protection de surface, la pratique est d'utiliser des abaques (par exemple celles du CIRIA). En revanche, il est actuellement impossible de qualifier, vis-à-vis de sa résistance à un écoulement de surverse, un sol constitutif d'un tronçon de digue. En conséquence, on considère actuellement en France que « les digues en terre ne supportent pas la surverse ». C'est la raison pour laquelle Irstea a développé un simulateur de surverse *in situ*, à échelle un. Le dispositif a été déployé dans le cadre du projet de recherche DigueELITE sur une digue expérimentale (hauteur de 3,5 m) construite en 2015, dans 2 canaux de 61 cm de large et 15 m de long, couvrant le talus aval (pente 1,5H/1V) et la plate-forme aval : l'un sur sol-chaux, l'autre sur sol non traité. Deux campagnes d'essais ont été réalisées (2016 et 2017), avec des débits allant jusqu'à 0,570 m<sup>2</sup>/s, des vitesses de 6 m/s en pied de talus, et une lame d'eau en crête correspondant à 50 cm en situation de surverse réelle. La première phase d'érosion est celle de la couche superficielle. La deuxième phase est celle du sol constitutif. L'érosion façonne le talus en marches d'escalier (head-cut), en faisant apparaître les couches de compactage. L'écoulement de surverse est donc assimilable à un écoulement aéré, fortement turbulent (skimming flow) sur pente avec marches. Les résultats obtenus permettent de quantifier la meilleure résistance du sol-chaux. Par rapport au sol non traité, le développement de la fosse d'érosion en pied de talus aval y est 5 à 10 fois moins important. Il a été possible d'interpréter les mesures suivant la norme ASTM-D6460 et de positionner les résultats sur l'abaque du CIRIA. Ce travail démontre qu'il est maintenant possible de quantifier la résistance à l'érosion de surverse du sol constitutif du remblai d'une digue.

## Abstract

The failure of a river dike following a flood exceeding the crest level of the structure is a scenario of the safety study. It is important to quantify the resistance to overflow. When the section is equipped with a surface protection, the practice is to use the abacuses (e.g. those of CIRIA). On the other hand, it is currently impossible to describe, with respect to its resistance to overflow, a soil constituting a dike section. As a result, it is currently considered in France that "earth dikes do not support overflow". This is why Irstea has developed an *in situ*, full-scale overflow simulator. The device was deployed as part of the DigueELITE research project on an experimental dike (height of 3.5 m) built in 2015, in two channels 61 cm wide and 15 m long, covering the downstream slope (slope 1.5H/1V) and the downstream platform: one on lime treated soil, the other on untreated soil. Two test campaigns were carried out (2016 and 2017), with flow rates of up to 0.570 m<sup>2</sup>/s, velocities of 6 m/s at the slope toe, and a corresponding water height at 50 cm in situation of real overflow. The first phase of erosion is that of the superficial layer. The second phase is that of the constitutive soil. Erosion shapes the slope in steps (head-cut), showing the layers of compaction. The free-surface flow is therefore comparable to an aerated flow, strongly turbulent (skimming flow) on steep slope with steps. The results obtained make it possible to quantify the best resistance of the lime treated soil. Compared to untreated soil, the erosion pit at the toe of the downstream slope is 5 to 10 times smaller. It was possible to interpret the measurements according to ASTM-D6460 standard and to position the results on the CIRIA chart. This work shows that it is now possible to quantify the overflow erosion resistance of the soil constituting the embankment of a dike.

# Simulation numérique d'un essai de surverse

## *Numerical simulation of overtopping experiment*

S. Jeuck<sup>1</sup>, G. Charrier<sup>1</sup>,  
F. Golay<sup>2</sup>, S. Bonelli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IRSTEA, Aix-en-Provence, [stephane.bonelli@irstea.fr](mailto:stephane.bonelli@irstea.fr)

<sup>2</sup> Université de Toulon, IMATH, Toulon, [frederic.golay@univ-tln.fr](mailto:frederic.golay@univ-tln.fr)

### Résumé

Nous considérons une digue en terre soumise à un écoulement de surverse. La modélisation physique et numérique d'un tel phénomène est en général un compromis entre pertinence physique, précision numérique et temps de calcul. Nous nous sommes attachés à l'analyse de l'écoulement à surface libre caractéristique d'une surverse, éludant momentanément les phénomènes d'érosion et de transport sédimentaire qui seront inclus ultérieurement par couplage. L'hydrodynamique complexe associée à la surverse est traitée grâce à un modèle bi-fluide Eulérien à faible nombre de Mach. Ce modèle bi-fluide, non visqueux et faiblement compressible est physiquement plus pertinent que les modèles de type Saint-Venant généralement utilisés. En effet, on observe dans l'écoulement des jets et des recirculations plus facilement appréhendés par un modèle diphasique. Ce modèle est évidemment moins riche qu'un modèle de Navier Stokes avec ou sans turbulence, mais sa formulation permet des simulations tridimensionnelles beaucoup plus économes en temps de calcul pour une représentation hydrodynamique réaliste. En effet, la formulation hyperbolique du problème à résoudre autorise l'utilisation d'un solveur volumes finis explicite parallèle rapide. Ce solveur bénéficie d'un outil de raffinement dynamique de maillage par blocs sur critère de production numérique d'entropie, qui permet d'optimiser le nombre d'inconnues et donc le temps de calcul, tout en augmentant la précision de la simulation dans les zones d'intérêt. Ce modèle est appliqué à l'étude de la surverse d'une digue expérimentale. Le parement aval de la digue est considéré lisse ou bien avec un profil en marches représentatif des observations expérimentales (Figure 1). Grâce au raffinement dynamique de maillage, l'établissement de l'écoulement est simulé rapidement. Puis, lorsque que l'écoulement stationnaire est atteint, les hauteurs et champs de vitesse sont confrontés avec succès à quelques mesures expérimentales. Ces résultats sont également comparés avec des simulations réalisées avec un code commercial utilisant un modèle Navier-Stokes diphasique avec turbulence  $k-\omega$  SST.

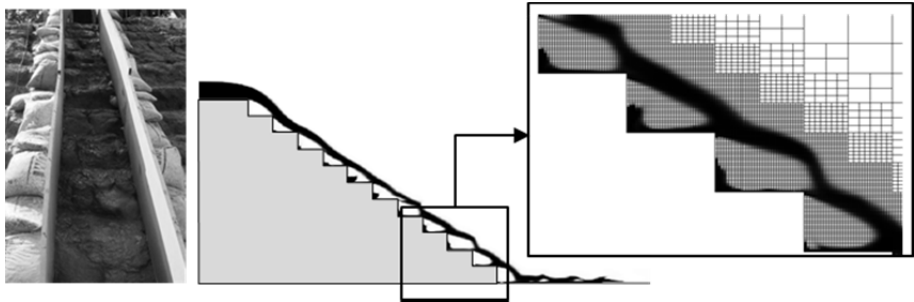


FIGURE 1 : (A GAUCHE) EROSION APRES UN ESSAI DE SURVERSE  
 (AU MILIEU) EXEMPLE DE SIMULATION DIPHASIQUE D'UNE SURVERSE  
 (A DROITE) ZOOM SUR L'ECOULEMENT AIR-EAU ET MAILLAGE DYNAMIQUE

### Abstract

In this paper, the overtopping of an earthen, cohesive dike is considered. Physical and numerical modelling of such phenomenon is often a compromise between physical relevance, numerical precision and computing time.

At this stage the overtopping free surface flow is modelled over a smooth or partly eroded slope. Progressive erosion and sediment transport phenomena are not addressed but shall be included later by (hydrodynamic) coupling. A bi-fluids Eulerian model at low Mach number is used to model the complex hydrodynamics of overtopping. This bi-fluid, non-viscous and almost incompressible model is physically more relevant than Saint-Venant models which are often used. Indeed, jets flows and recirculations are better dealt with by diphasic models. Although this model is inherently less accurate than a Navier-Stokes model, whether it is turbulent or not, its formulation provides a realistic three-dimensional representation of hydrodynamics through (computing) time-wise cheaper simulations.

Specifically, the hyperbolic formulation of the problem to solve allows the use of a fast parallel explicit finite volume solver. It benefits from dynamic mesh refinement based on numerical entropy production criteria, in order to optimize the number of unknowns, thus computing time, while increasing the accuracy in areas of interest. Thanks to the adaptive mesh refinement procedure, steady flow conditions are quicker to obtain, and height and velocity field are in good agreement with field measurements. The results are also compared to computations performed with a commercial CFD software using a diphasic Navier-Stokes model and  $k-\omega$  SST turbulent model.



# **Modélisations du développement d'une brèche par surverse et du transport sédimentaire associé**

## ***Modelling the development of a breach caused by overtopping and associated sediment transport***

**A. Paquier<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Irstea, UR RiverLy, Villeurbanne, [andre.paquier@irstea.fr](mailto:andre.paquier@irstea.fr)

### **Résumé**

Dans un code hydrodynamique 2D, le développement d'une brèche dans un remblai peut être représenté de deux manières :

- en associant aux équations hydrodynamiques, des équations qui décrivent le transport des sédiments, l'érosion et le dépôt au droit du remblai et de son environnement immédiat (approche « intégrée ») ;
- en utilisant un modèle de brèche qui calcule spécifiquement l'évolution des caractéristiques d'une brèche.

En outre, ces deux approches peuvent être associées, à savoir utiliser le modèle spécifique pour la brèche et le modèle général de transport sédimentaire pour l'aval de la brèche afin, par exemple, de simuler l'entraînement des matériaux.

En se focalisant sur une utilisation en ingénierie, on compare, pour différentes valeurs des paramètres, les résultats des quatre types de calcul suivants : l'approche « intégrée » avec ou sans terrain naturel érodable, l'ouverture de la brèche en utilisant le modèle de brèche avec ou sans transport sédimentaire. L'influence des paramètres suivants est particulièrement étudiée : les dimensions des mailles de calcul (5 m, 20 m ou 100 m), le taux d'érosion soit proportionnel à l'excédent de contrainte par rapport à une contrainte critique, soit déterminé à partir d'une capacité de transport calculée par la formule de Meyer-Peter et Müller.

Le cas de terrain choisi pour la comparaison (une brèche dans une digue le long de l'Agly lors de la crue de 1999) est caractérisé par une faible charge et une faible durée de surverse, ce qui conduit à une limitation du développement de la brèche (dont la largeur maximale est, par construction, fixée à 45 mètres qui est la valeur observée). En outre, l'érosion latérale (effondrement des parois de la brèche) n'a pas été considérée (sauf indirectement dans le modèle de brèche lorsque la brèche rectangulaire s'élargit pour atteindre sa valeur maximale sur la maille). En général, la brèche se développe sur, au moins, une largeur de maille pour le module spécifique de brèche alors que l'approche intégrée donne un développement faible ou nul pour les mêmes coefficients d'érosion « standard ». Dans tous les cas, les

débâts de pointe de l'hydrogramme au droit de la brèche sont significativement réduits par rapport à un calcul avec ouverture instantanée de la brèche sur toute sa largeur qui donne des hauteurs d'inondation plus réalistes, ceci suggère un taux d'érosion trop faible mais s'explique aussi par l'inondation préalable du lit majeur (non modélisée) du fait des difficultés d'évacuation des eaux de pluie et d'infiltration. Si le terrain naturel est non érodable, l'introduction du transport sédimentaire a peu d'influence ; en revanche, si on autorise l'érosion de ce terrain jusqu'à 1 mètre de profondeur, cette profondeur est atteinte pour les brèches les plus importantes et cela a pour conséquence une brèche finale un peu plus grande mais pas forcément un débit de pointe au droit de la brèche plus fort ni des niveaux d'eau plus élevés à l'aval de la brèche. Toutefois, on s'aperçoit que le mode de calcul de l'érosion au droit de la brèche et les paramètres qui la déterminent restent les facteurs principaux d'incertitude des résultats même si un maillage plus raffiné permet de mieux représenter l'évolution des caractéristiques de la brèche.

### **Abstract**

In a 2-D hydrodynamic code, the development of a breach in a levee can be represented by two ways:

- associating to hydrodynamic equations some equations that describe the sediment transport, the erosion and the deposition to the levee and the surrounding area (integrated approach);
- using a breach model that specifically calculates the evolution of the breach features.

Moreover, these two approaches can be associated, *I.E.* using the specific model for the breach and the general sediment transport model for the area downstream from the breach in order to simulate the sediment entrainment.

Using a field case study (a breach in a levee along Agly River), the two methods are compared for various sets of parameters. These parameters can be common to the two models (such as the size of the cells, the friction coefficients, the erosion rate) or be specific to one approach (such as the evolution of the breach geometry).

Using identical erosion parameters, the weak head and short overtopping duration prevent the development of the breach if an integrated approach is used while, generally, the breach develops over, at least, one cell width with the breach model. For the two approaches, the erosion downstream from the breach can be simulated and it has a weak but certain influence on the breach development and, consequently, the breach hydrograph. Yet one can see that the method for calculating erosion and the parameters that are associated are the main uncertainty factors for all the results.

# Accidentologie des digues du delta du Rhône de 1840 à nos jours

## *Accidentology of the levees of the Rhône delta from 1840 to the present day*

T. Mallet<sup>1</sup>, J.J. Fry<sup>2</sup>, R. Tourment<sup>3</sup>, P. Mériaux<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Symadrem, Arles, [thibaut.mallet@symadrem.fr](mailto:thibaut.mallet@symadrem.fr)

<sup>2</sup> EDF-CIH, Bourget du Lac, [jean-jacques.fry@edf.fr](mailto:jean-jacques.fry@edf.fr)

<sup>3</sup> Irstea, Aix-en-provence, [remy.tourment@irstea.fr](mailto:remy.tourment@irstea.fr)

### Résumé

Les digues du Delta du Rhône ont été sensiblement rehaussées après les grandes crues de 1840 et 1856 en lieu et place d'autres ouvrages encore plus anciens, dont certains remontent au XII<sup>ème</sup> siècle. Du fait de leur mode de réalisation (compactage avec des dames de 15 kg) et de leur composition très hétérogène (alternance limons/sables) due aux phases successives de construction (effet mille-feuille), ces digues sont très exposées au risque de brèches en crues.

Dans le cadre des études de dangers (EDD) exigées par la réglementation française, une étude accidentologique a été menée sur l'ensemble du parc de digues fluviales géré par le SYMADREM (210 km de digues fluviales). Le présent article en présente les principaux résultats en distinguant :

- la période récente s'étalant de 1993 à nos jours,
- la période plus ancienne s'étendant de 1840 à 1886.

La période intermédiaire 1886-1993 qui correspond à la veille hydrologique du Rhône n'a pas été étudiée, du fait de l'absence d'archives pour cette période.

Dans une première partie, il est proposé une classification des incidents et des accidents en trois catégories : les brèches, les départs de brèche et les désordres, pour lesquels une définition est préalablement donnée.

La deuxième partie présente pour chacune des catégories, un bilan et des statistiques par mode initiateur de rupture (érosion interne, surverse, affouillement du pied amont et glissement). Elle étudie également, par initiateur de rupture, le processus conduisant du désordre à la brèche et sa cinétique, ainsi que l'impact des travaux d'intervention d'urgence sur ce processus. Elle conclut sur les enseignements à retenir pour les études de dangers.

La troisième partie dresse un bilan des caractéristiques géométriques des brèches et de leurs conséquences sur la zone protégée.

La conclusion de l'article rappelle l'étape incontournable que constitue l'étude

accidentologique dans l'analyse de risques, pour la détermination des scénarios de brèches, le calage des méthodes probabilistes d'évaluation des risques et la détermination des scénarios d'inondation.

### **Abstract**

Levees of the Rhone Delta were significantly raised after the great floods of 1840 and 1856 in place of other works even older, some dating back to the 12<sup>th</sup> century. Given their form of construction (compaction with manual tamping devices of 15 kg) and their heterogeneous composition (alternating silt/sand) due to successive stages of building, levees are susceptible to breaching during floods.

As part of the hazard studies required by french regulations, an inquiry on incidents was carried out on the whole levees system managed by SYMADREM (210 km of river levees). This paper presents the main results by distinguishing:

- the recent period from 1993 up to today,
- the older period extending from 1840 to 1886.

The intermediate period 1886-1993 corresponding to the hydrological watch of the Rhone has not been studied because of the lack of archives for this period.

In the first part, a classification of incidents and accidents is proposed in three categories: breaches, breaches in progress and disorders, for which a definition has been given.

The second part presents, for each category, a report and statistics by initiating failure mode (internal erosion, overflowing, scour and sliding). It also studies by failure modes the kinetics of the process of progression until breaching as well as the impact brought by emergency intervention works and concludes on the lessons to be learned for the risk assessment. The third part reviews the geometrical characteristics of the breaches and their consequences on the protected area. The conclusion of the paper recalls the essential step of the inquiry on past incidents in the risk assessment, for the determination of the breaches scenarios, the calibration of probabilistic risk assessment methods and the determination of the inundation scenarios.

# **Retour d'expérience sur 10 années de réalisation d'essais d'érosion sur des sols provenant d'ouvrages hydrauliques**

## ***Feedback from 10 years of erosion tests on soils from hydraulic structures***

**R. Beguin<sup>1</sup>, C. Moras<sup>1</sup>, M. Boucher<sup>1</sup>, C. Vinay<sup>1</sup>, J.-R. Courivaud<sup>2</sup>,  
P. Pinettes<sup>1</sup>, C. Picault<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>geophyConsult, 73000 Chambéry, [remi.beguin@geophyconsult.com](mailto:remi.beguin@geophyconsult.com)

<sup>2</sup>EDF-CIH, 73373 Bourget-du-lac, [jean-robert.courivaud@geophyconsult.com](mailto:jean-robert.courivaud@geophyconsult.com)

<sup>3</sup>Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques, CNR, 69007

Lyon

### **Résumé**

Le projet national ERINOH (ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques) a permis le développement en France de dispositifs destinés à tester en laboratoire et/ou *in situ* la résistance à l'érosion des sols. Pour chaque typologie d'érosion, un dispositif spécifique a été développé : le HET (Hole Erosion Test) pour la caractérisation de la résistance à l'érosion de conduit (aussi appelée « renard hydraulique ») [1,2]; le JET (Jet Erosion Test) adapté notamment pour l'estimation de la résistance à la surverse [3]; le CET (Contact Erosion Test) dédié à la résistance à l'érosion d'une interface entre deux couches de sols [4], ainsi que d'autres appareillages, pour la suffusion notamment. Ces essais se sont diffusés dans la profession et commencent à être régulièrement utilisés dans le cadre de réalisation de diagnostics d'ouvrages hydrauliques, pour la sélection de matériaux pour des constructions d'ouvrages neufs ou encore pour contrôler des confortements réalisés par traitement des sols. geophyConsult commercialise des essais JET (depuis 2009), HET et CET ainsi que, ponctuellement, des essais de suffusion sur-mesure et de dispersivité. Durant ces 10 années, plus de 450 essais d'érosion ont ainsi été réalisés sur des sols d'ouvrages hydrauliques, principalement français.

L'analyse de cette base de données permet une comparaison de la gamme de résistance à l'érosion avec les classifications reconnues internationalement. Cette confrontation souligne qu'il existe parfois un décalage systématique, en partie lié au fait qu'elles ont été bâties à l'étranger sur des types de sol qui diffèrent de ceux fréquemment rencontrés en France. Cette gamme de résistance constatée est illustrée par une application numérique pour une digue typique afin d'obtenir des ordres de grandeur de sensibilité à l'érosion correspondants (temps de rupture...). Ensuite, la comparaison des essais réalisés sur échantillons intacts avec ceux réalisés sur échantillons remaniés souligne l'importance de ce paramètre. L'analyse de la qualité des essais réalisés en fonction du type de sol testé permet de définir des gammes de

sol compatibles avec chacun des dispositifs. Un bilan est aussi tiré du retour d'expérience des opérateurs sur la réalisation de ces essais : sélection d'échantillons au sein des carottes, facilité de mise en œuvre, difficultés généralement rencontrées, complémentarité entre les dispositifs... Enfin, les évolutions des bancs d'essai durant cette période sont présentées, avec notamment le développement d'un Large JET pour s'affranchir des limites de l'essai JET original.

### Abstract

The national project ERINOH (Internal Erosion in Embankment Dams) has enabled the development in France of devices dedicated to test in the laboratory and / or *in situ* the resistance against erosion of soils. For each type of erosion, a specific device has been developed: HET (Hole Erosion Test) for the characterization of piping [1][2]; the JET (Jet Erosion Test) more specifically adapted especially to the determination of the resistance to overtopping [3]; the Contact Erosion Test (CET) dedicated to the resistance to erosion of an interface between two layers of soil [4] ; and other devices, including suffusion tests. All tests have progressively spread throughout the profession and are now used regularly. geophyConsult sells JET (since 2009), HET and CET tests, as well as more punctually tailor-made suffusion and dispersivity tests. During the last 10 years, more than 450 erosion tests have been carried out on soils of mainly French hydraulic structures,.

The acquired database has been confronted with internationally recognized classifications and systematic discrepancies have been noted. The resistance range obtained has been illustrated by numerical applications (breaching time, initiation conditions, etc.). The analysis of the quality of the tests carried out according to the type of soil tested makes it possible to define soil ranges compatible with each device. An assessment is also drawn from operators' experience feedback on the way the tests have to be carry out : how should the samples be selected within the cores, how easy is the implementation of the tests, what difficulties are generally encountered, are the devices complementary... Finally, changes in tests benches during the studied period are presented, including the development of a Large JET, aimed at overcoming the limitations of the original JET test.

### Références :

- [1] Wan, C.F., Fell R. (2004), Laboratory Tests on the Rate of Piping Erosion of Soils in Embankment Dams, *Geotechnical Testing Journal*, 27(3), 295-303
- [2] Bonelli S. (coord.) (2012), Érosion des géomatériaux, *Traité MIM*, Hermès Edt, 382
- [3] Hanson and Cook (2004), Apparatus, test procedures and analytical methods to measure soil erodibility *in situ*. *Applied engineering in agriculture*, 20 (4): 455-462.
- [4] Guidoux C., Faure Y.-H., Beguin R., Ho, C.-C. (2010), Contact erosion at the interface between granular coarse-soils and various base-soils under tangential flow condition, *J. Geotech. and Geoenvir. Eng.* Volume 136, Issue 5, pp. 741-750

# **Analyse de sensibilité des paramètres de rupture des digues : Application au cas de la Garonne**

## *Sensitivity analysis of levee breach parameters: Application to the Garonne River*

**L. Pheulpin<sup>1</sup>, V. Bacchi<sup>1</sup>, N. Bertrand<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses,  
[lucie.pheulpin@irsn.fr](mailto:lucie.pheulpin@irsn.fr)

### **Résumé**

En domaine fluvial, le principal rôle des digues est de canaliser l'eau afin de réduire le risque d'inondation. Toutefois, en période de crue, ces digues peuvent être endommagées par le biais de mécanismes physiques comme l'érosion, causée par exemple, par une surverse. De ce fait, il est important de prendre en compte les ruptures de digues induites par de tels phénomènes dans les modèles hydrauliques qui sont utilisés pour la quantification de l'emprise des zones inondables et des niveaux d'eau associés. Cependant, la modélisation des digues et de leur rupture est complexe et repose sur un certain nombre de paramètres incertains, liés à la géométrie des brèches potentielles et aux mécanismes de ruptures implémentés dans les modèles numériques. Dans ce contexte, l'objectif de l'étude est de réaliser une analyse de sensibilité visant à mieux déterminer l'impact des paramètres de rupture des digues utilisés dans un modèle hydraulique 1D, sur les débordements générés. Pour cela, un modèle à casiers de la Garonne, construit et validé préalablement avec le code HEC-RAS, a été utilisé. Le cas d'étude repose sur l'analyse de la crue historique de 1981, sur un bief de 63 km entre les communes de Tonneins et La Réole, durant laquelle plusieurs digues ont cédé (Figure 1). La méthodologie s'appuie sur une propagation d'incertitudes des paramètres de brèches, réalisée grâce au couplage de deux outils : HEC-RAS et l'environnement de modélisation IRSN, Prométhée (<http://promethee.irsn.org/>). Les paramètres des digues sont considérés uniformément distribués et tirés aléatoirement afin de générer un nombre élevé de scénarios de rupture. L'analyse de sensibilité a été focalisée sur les paramètres de brèches (géométrie, temps de formation et coefficient de seuil de la brèche) correspondant aux paramètres de l'équation de seuil utilisée par HEC-RAS. Les analyses de type Monte-Carlo et FAST (Fourier Analysis Sensitivity Test) réalisées, ont montré la forte influence du paramètre de surverse, sur le remplissage des casiers, puis des paramètres liés à la géométrie de la brèche. L'étude permet également de souligner la forte différence entre la zone aval et celle amont du modèle, qui est plus sensible aux ruptures de digues.

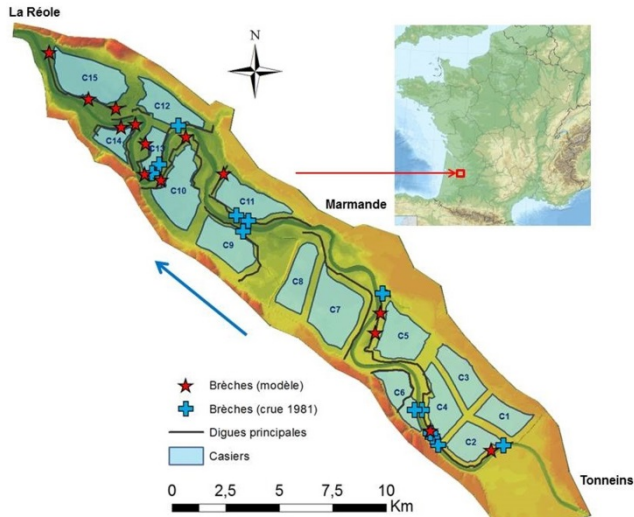


FIGURE 2 : STUDY CASE: THE GARONNE RIVER

## Abstract

In a fluvial environment, the main role of levees is to canalize water downstream of rivers to reduce the risk of flooding to nearby areas. However, during flood periods, levees can be damaged by physical mechanisms as erosion due to overflowing, for instance. As a consequence, it is necessary to take into account levee breaches induced by floods in hydraulic models. Nevertheless, levee breaches modeling is a complex phenomenon, which relies on a number of uncertain parameters, dependent from the breach geometry and from the mechanisms implemented in numerical models. In this context, the objective is to perform a sensitivity analysis to better understand the impact of breach parameters, used in a 1D hydraulic model, on the generated overflows. A model with storage areas of the Garonne River, preliminary built and validated with the HEC-RAS code, was used. The study case is based on the 1981 historical flood event between Tonneins and La Réole, in a river section of 63 km, during which several levees failed (Figure 1). The methodology relies on an uncertainty propagation of the breach parameters, performed through the coupling of HEC-RAS and the computational environment Promethee developed by IRSN. The breach parameters are uniformly distributed and randomly sampled in order to generate a large number of breach scenarios. The Monte-Carlo and the FAST (Fourier Analysis Sensitivity Test) analyses performed in this study show the strong influence of the overflow parameter and breach geometry on the water height in a given storage area. The study also highlights the major difference between upstream and downstream parts of the river. Indeed, the upstream area is much more sensitive to levee breaches than the downstream area, so the uncertainties are higher.



# Thème 5

**Aide à la décision – ouvrages :  
reconnaisances, surveillance, auscultation,  
diagnostic, des digues et ouvrages associés**

## Comité scientifique

### *Animateurs de la session orale :*

Jean-Robert Courivaud	EDF CIH
Nathalie Rosin-Corre	Tractebel

### *Relecteurs :*

Jean-Robert Courivaud ( <i>Coordinateur</i> )	EDF CIH
Sérgio Palma-Lopes	IFSTTAR
Nathalie Rosin-Corre	Tractebel



# **Bief de Montambert : analyse de mécanismes de rupture de digues dans les argiles à silex du bassin parisien**

## ***Montambert channel: failure mechanisms of embankment structure in flint clay of Parisian Basin***

**S. Mével<sup>1</sup>, T. Noblet<sup>2</sup>, R. Clavel<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ISL Ingénierie, Lyon, [mevel@isl.fr](mailto:mevel@isl.fr)

<sup>2</sup> ISL Ingénierie, Angers, [noblet@isl.fr](mailto:noblet@isl.fr)

<sup>3</sup> VNF DTCE, Dijon, [robert.clavel@vnf.fr](mailto:robert.clavel@vnf.fr)

### **Résumé**

Le bief de Montambert, long de 8,4 km, est situé sur le canal de Briare au Sud de Montargis. Il s'agit d'un des plus anciens canaux de France, puisque sa construction date du 17<sup>ème</sup> siècle. Depuis l'hiver 2002, des incidents à répétition ont été observés principalement sur deux zones du bief : la zone dite « des Fourneaux » et la zone dite « de la Step ».

Les objectifs de cet article sont de présenter l'ensemble des pathologies observées lors des différents incidents, détailler les reconnaissances géotechniques et géophysiques mises en œuvre dans le but de mieux comprendre le contexte géologique et géotechnique, puis de présenter les mécanismes de rupture qui semblent être les plus adaptés aux incidents observés. Enfin, une première réflexion sur l'auscultation et les méthodes de confortement acceptables est donnée.

Au niveau de la zone « de la Step », deux accidents sont analysés. Le premier accident est une ouverture de brèche survenant après une période de chômage. Le second accident est une ouverture de cavité verticale en fond de canal, alimentant des résurgences de type sand boils à l'aval de la digue. Le mécanisme de rupture présenté est une initiation des écoulements depuis le canal au contact avec les palplanches, initié par exemple par des fissures de retrait de l'argile suite à une période de chômage, puis une circulation de l'eau dans un réseau de vides naturels dans la fondation menant par érosion à la formation d'une cavité sous la digue jusqu'à l'ouverture d'une brèche.

Pour la zone dite des « Fourneaux », deux autres accidents sont analysés. Le premier est une ouverture de brèche faisant elle aussi suite à une période de chômage. Le second est une ouverture de brèche durant une forte crue. Deux mécanismes de rupture différents sont proposés. Le premier mécanisme est le développement

d'érosion de conduit dans des fissures de retrait de l'argile après la période de chômage. Le second est la mise en pression de la digue par la nappe de rive (et non par l'eau du canal) et la formation de « geysers » par soulèvement hydraulique de l'ouvrage.

Afin d'éviter ces incidents il est proposé d'équiper ces ouvrages de piézomètres afin de contrôler le niveau de la nappe dans l'ouvrage. La réalisation de puits de décompression paraît être une solution viable notamment pour rabattre la nappe de rive. Un couplage entre reconnaissances géotechniques et géophysiques permettrait de définir les zones potentiellement problématiques vis-à-vis de ces mécanismes de rupture, par exemple par l'absence d'une couche argileuse saturée sous l'ouvrage ou sous le canal.

Pour les deux zones étudiées, les origines des accidents sont soit un remplissage post-chômage, soit les écoulements d'eau venant de la rive gauche et probablement alimenté par la nappe de Beauce, soit une combinaison des deux.

### **Abstract**

The Montambert channel is located on the Briare Canal stationed in the south of Montargis and has a length of 8.4km. Since the winter of 2002, repeated incidents have occurred in two following areas: in the zone known as "les Fourneaux" and in the one called "la Step". This article's main purpose is to present the different disorders and their characteristics, whilst detailing the geotechnical and geophysical investigations in order to present the mechanisms that were found to be the most suitable to the given circumstances. Regarding the "Step" zone, the flows coming from the channel along the sheet pile wall (mechanism triggered by the clay's shrinkage cracks, following an emptying period) initiated the failures observed. Furthermore, the circulation of water in a network of natural voids, in the embankment's foundation, leads to the creation of a cavity until the opening gap. Concerning the so-called "Fourneaux zone", two failure mechanisms are highlighted. The first one is the development of conduct erosion in the cracks of shrinkage of the clay. The second mechanism is the consequence of the pressurization of the embankment by the water from the bank with the formation of a "geyser". In order to avoid these kinds of incidents, it is proposed to enhance monitoring system with piezometers, in order to control water level. To reduce the water pressure under the embankment, relief wells could be drilled. Combined geotechnical and geophysical investigations could help to build the maps of hazardous sectors (for instance where no clay layer is detected under the dike or under the channel).

# **Auscultation d'un barrage en terre soumis à érosion, du diagnostic aux travaux de confortement**

## ***Internal Erosion in a earth-filled dike – from diagnostic to reinforcement works***

**N. Le<sup>1</sup>, B. Chalus<sup>2</sup>, P. Serve<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Compagnie Nationale du Rhône (CNR), Lyon, [n.le@cnr.tm.fr](mailto:n.le@cnr.tm.fr)

<sup>2</sup> Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, [b.chalus@cnr.tm.fr](mailto:b.chalus@cnr.tm.fr)

<sup>3</sup> Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, [p.serve@cnr.tm.fr](mailto:p.serve@cnr.tm.fr)

### **Résumé**

L'endiguement CNR de l'aménagement de Bourg-Lès-Valence, à l'amont immédiat du barrage de la Roche de Glun vers le PK 99.2 RG, a présenté des anomalies de fonctionnement peu après sa mise en eau. Au droit de ce tronçon d'endiguement, le talus aval de digue vient buter contre le soutènement de la tête amont de l'aqueduc en créant une petite plateforme derrière le soutènement.

Depuis 2011, des fontis sur la plateforme de l'aqueduc et des fines observées à la sortie des drains des soutènements ont mis en évidence un phénomène d'érosion interne. Un suivi piézométrique, un suivi de déplacement des murs et des contrôles visuels régulier permettent de détecter toute anomalie de comportement de l'ouvrage. En parallèle, plusieurs actions de reconnaissances (reconnaissance géophysique, géotechnique et mesures thermométriques) ont été entreprises dans le cadre du diagnostic pour préciser le type d'érosion interne, localiser la zone d'infiltration.

En été 2015, suite à l'évolution des désordres, les actions préventives ont été menées. Parmi ces actions, le clapage du talus amont de la digue avec des limons a montré une efficacité immédiate : un colmatage des zones d'infiltration à travers de la digue.

Le diagnostic de fin 2015 a confirmé que cette zone d'incident est soumise à un phénomène d'érosion interne en phase « progression », probablement déclenchée par deux principaux mécanismes d'érosion : suffusion et régressive de conduit. L'érosion interne est à l'origine des désordres observés sur la plateforme et ses soutènements. La zone d'anomalie s'étend sur un linéaire de digue d'environ 80 mètres. La zone principale d'infiltration et des écoulements différentiels ont pu également être identifiés. Les travaux de confortement ont été préconisés afin de stopper les importantes infiltrations à travers de la digue.

Des travaux de réalisation d'une paroi étanche sont engagés depuis début 2018. La surveillance des ouvrages et le suivi des travaux apportent les informations complémentaires sur le comportement de la digue et permettent de valider la pertinence du diagnostic et du projet de confortement. Depuis les travaux de confortement, les fuites se sont tariées et aucun désordre n'a été observé.

### **Abstract**

The CNR earth-fill embankment of Bourg-Lès-Valence, located directly upstream of the Roche de Glun dam at PK 99.2 RG, presented anomalies shortly after its impoundment. At this section, the dike downstream slope abuts against the retaining walls of an aqueduct, creating a platform behind the retaining walls.

Since 2011, some jugholes on the platform and some zones of seepage with transport of soil particles towards the counterchannel were observed. They reveal an internal erosion phenomenon in the dike. A piezometric monitoring network and regular visits were carried out to detect any anomalous behavior of the structure. In parallel, several site investigations (geophysics, geotechnics and thermometric methods) were undertaken in order to understand the erosion phenomenon and to locate the seepage zones.

In 2015, following a significant evolution of the disorders, some preventive actions were carried out. Among them, a clogging operation using fine soils on the upstream slope brought an immediate effect on reducing the seepage through the dike.

Reinforcement work by creating a cut-off wall was started at the beginning of 2018. The monitoring system and the supervision during the work bring some interesting news on the dike behaviour and allow to confirm the conclusions of the diagnosis and the efficiency of reinforcement project.

### **Références :**

- CIGB ICOLD (2015), Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundation, Bulletin 164- Volume 1, Internal erosion processes and engineering assessment;
- DEROO L. FRY J.-J. Projet national ERINOH Thème H Erosion interne – Approches et besoins en matière d'ingénierie, Juillet 2014.
- GARANDET *et al.* (2012) : Approches comparées de la thermométrie et des mesures de résistivité pour caractériser les écoulements d'une digue, pp 242-255, Colloque CFBR, Chambéry, 2012.

# **Fusion d'informations géophysiques et géotechniques acquises sur banc d'essai pour application au diagnostic de digues**

## ***Merging geophysical and geotechnical data acquired on a test bed for levee diagnosis application***

**T. Dezert<sup>1,2</sup>, S. Palma Lopes<sup>1</sup>, Y. Fargier<sup>2,3</sup>,  
Q. Forquenot de la Fortelle<sup>1</sup>, P. Côte<sup>1</sup>, R. Tourment<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> IFSTTAR, GERS, GeoEND, 44344 Bouguenais, [theo.dezert@ifsttar.fr](mailto:theo.dezert@ifsttar.fr)

<sup>2</sup> Cerema Direction territoriale Normandie-Centre, 41000 Blois

<sup>3</sup> Univ Lyon, IFSTTAR, GERS, RRO, 69675 Bron, [yannick.fargier@ifsttar.fr](mailto:yannick.fargier@ifsttar.fr)

<sup>4</sup> Irstea, Aix en Provence, [remy.tourment@irstea.fr](mailto:remy.tourment@irstea.fr)

### **Résumé**

Les digues de protection fluviales représentent des enjeux majeurs en matière de sécurité des personnes et des biens matériels (van der Veen, 2003). Il s'agit de prévenir leur rupture, associée à des phénomènes d'érosion interne, externe ou d'instabilité, en apportant un meilleur diagnostic. La caractérisation des matériaux, ainsi que la détection d'interfaces et d'anomalies éventuelles sont déterminantes (François *et al.*, 2016). Lors de campagnes de reconnaissance, des méthodes complémentaires, géophysiques et géotechniques, sont utilisées. Les informations acquises par ces deux ensembles de méthodes s'expriment à des échelles spatiales différentes, avec différents niveaux d'incomplétudes et avec des ordres de grandeur d'incertitudes et d'imprécisions différents. Nous nous concentrons dans ce travail sur l'emploi de deux méthodes spécifiques. Il s'agit d'acquérir des données sur un banc d'essai parallélépipédique (plâtre + sable saturé) mis en place, afin de valider une approche de fusion d'informations basée sur la théorie de l'évidence (Dempster, 1967 ; Shafer, 1976) et sur l'utilisation des fonctions de croyance afin de caractériser au mieux le modèle investigué. Un mini-dispositif de tomographie de résistivité électrique est placé en surface de modèle afin d'acquérir une information physique spatialisée et un cône de pénétration de laboratoire est utilisé afin de caractériser la profondeur d'enfoncement de chaque matériau. Nous présentons ici, les méthodes d'acquisitions utilisées, les matériaux sélectionnés et leur mise en place au sein du banc d'essai, les méthodes de fusion employées ainsi que les résultats obtenus suite à une telle méthodologie avec réalisation de phase expérimentale. L'algorithme de fusion d'informations développé permet de mettre en évidence la présence d'interfaces entre matériaux, la variation d'épaisseur au coeur du modèle, ainsi que

de caractériser et distinguer les différents matériaux mis en place. Nous considérons dans ce travail trois différentes règles de combinaison de l'information afin de comparer les résultats obtenus. Par ailleurs, nous simulons également la réalisation de 2, 3, 5 et 8 sondages placés à différentes positions afin de pouvoir comprendre l'impact du nombre et de la position des sondages dans le cas d'une étude d'ouvrage. Les résultats issus de la fusion permettraient lors d'une véritable campagne, d'optimiser le placement des sondages et leur nombre en fonction de la qualité de l'information géophysique obtenue, afin d'améliorer la connaissance de l'ouvrage à moindre coût.

## Abstract

Fluvial levees are assets of major importance for protecting human lives and material goods (van der Veen, 2003). It is an important matter to prevent their rupture, associated with phenomena of internal and external erosion or instability, in bringing a better diagnosis. The characterization of the constitutive materials, as well as the detection of possible interfaces and anomalies, are crucial (François *et al.*, 2016). During investigation campaigns, complementary geophysical and geotechnical methods are used. These two sets of methods allow the data acquisition with different spatial scales and orders of magnitude of incompleteness, uncertainty and inaccuracy. In this work, we focus on the use of two specific methods. We set up a parallelepiped test bed (plaster + saturated sands) and acquire geophysical and geotechnical data on it, in order to validate an information fusion approach based on the evidence theory (Dempster, 1967; Shafer, 1976) and the use of belief functions. The objective is to characterize as well as possible the investigated model. We position a mini-electrical resistivity tomography device on the model surface to acquire spatialized physical information and we use a laboratory penetration cone to characterize the depth of penetration of each material. The developed data fusion algorithm makes it possible to highlight the presence of interfaces between materials, the existing variation of thickness, as well as to characterize and distinguish the different set up materials. The merging results, for a real investigation campaign on-site, would allow the optimization of the boreholes positioning, their number and their spacing according to the quality of the acquired geophysical information, to improve the knowledge of the structure at lower costs.

## Références :

- van der Veen A., Steenge A.E., Bockarjova M., Logtmeijer C.J. (2003). *Structural economic effects of large scale inundation: a simulation of the Krimpen dike breakage*. DC1-233.12.
- François D., Mériaux P., Monnet J. (2016). *Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai*. Presses des Ponts : Publications IREX, Paris. OCLC: 966418274.
- Dempster A. P. (1967). *Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping*. The annals of mathematical statistics, 325-339.
- Shafer G. (1976). *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press.



# Conception et installation d'un système de surveillance innovant pour des digues de protection contre les crues du Rhône

## *Design and installation of an innovative surveillance system for flood protection dikes along the Rhone River*

C. Guidoux<sup>1</sup>, T. Mallet<sup>2</sup>,  
J.-R. Courivaud<sup>3</sup>, D. Chaussée<sup>4</sup>

<sup>1</sup> geophyConsult, Chambéry, [cyril.guidoux@geophyConsult.com](mailto:cyril.guidoux@geophyConsult.com)

<sup>2</sup> SYMADREM, Arles, [thibaut.mallet@symadrem.fr](mailto:thibaut.mallet@symadrem.fr)

<sup>3</sup> EDF, Le Bourget du Lac, [jean-robert.courivaud@edf.fr](mailto:jean-robert.courivaud@edf.fr)

<sup>4</sup> SUEZ Consulting, Aix en provence, [denis.chaussee@suez.com](mailto:denis.chaussee@suez.com)

### Résumé

Dans le cadre de son programme de confortement des digues de protection contre les inondations du Rhône aval, le SYMADREM (Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Digués du Delta du Rhône et de la Mer) a missionné SUEZ Consulting pour réaliser études et travaux de confortement de la digue de 13 km en rive droite du Rhône entre Beaucaire et Fourques. L'étude de diagnostic de sûreté a montré que la digue est très exposée au risque d'érosion interne en situation de crue. Pour pallier ce risque, le SYMADREM a engagé un programme de confortement structurel de cet ouvrage visant à renforcer principalement deux barrières de défense passives : l'étanchéité et la filtration / drainage. Étant donné les enjeux de sûreté de la digue (50 000 personnes dans la zone protégée), le SYMADREM a souhaité compléter ce confortement par un renforcement du dispositif d'auscultation. L'objectif est de détecter précocement, en situation de crue du Rhône, l'apparition de fuites à travers la digue, puis de surveiller leur évolution, notamment spatialement, le long de la digue. La solution technique retenue par le SYMADREM est la technologie de détection des fuites par mesures passives de température par fibre optique proposée par EDF et geophyConsult. En effet, la mesure de température constitue aujourd'hui l'une des mesures les plus pertinentes pour détecter la présence de fuites au sein d'ouvrages en terre, permettant de compléter la surveillance du comportement hydraulique assurée à ce jour par une instrumentation classique (Guidoux 2015, Beck 2015).

Cet article présente la conception et la réalisation de ce système d'auscultation. Après présentation des objectifs du système d'auscultation, puis des principales caractéristiques du projet de digue confortée, l'architecture générale du système de surveillance est présentée. La position de la fibre optique au sein de l'ouvrage est

justifiée à l'aide d'une modélisation numérique aux éléments finis représentant les écoulements et la température dans une section verticale représentative de la digue. Cette modélisation permet de représenter les défauts (zones plus perméables traversant l'ouvrage de part en part) que l'on souhaite être en mesure de détecter. Elle permet en outre de simuler l'influence de ces défauts sur les paramètres d'écoulements internes et sur la température au sein de l'ouvrage et de sa fondation. Les données de modélisation permettent enfin d'optimiser la position de la fibre optique au sein de l'ouvrage et de justifier la capacité de cette méthode à détecter les défauts recherchés. Les principales caractéristiques techniques du système de surveillance par fibre optique sont ensuite décrites, ainsi que l'avancement des travaux de ce chantier s'achevant fin 2018. Un retour d'expérience exhaustif du terrain (cadences de pose, contraintes de phasage sur les travaux de terrassement en fonction de la position de la fibre, croisements avec les ouvrages traversants) est présenté. Le système a été mis en place avec succès durant les travaux de confortement des ouvrages de protection contre les crues en rive droite du Rhône entre Beaucaire et Fourques en 2017 et 2018. L'exploitation de ce système sera effective en 2019.

### **Abstract**

As part of its program to enhance the protection of its dikes against flood, SYMADREM has charged SUEZ Consulting to carry out studies and reinforcement works on the 13 km long dikes along the right bank of the Rhône between Beaucaire and Fourques (Gard, France). To mitigate the internal erosion risk highlighted by the safety diagnosis, a structural reinforcement of the structure has been initiated, mainly aimed at strengthening the sealing, the filtration and the drainage functions. Given the importance of safety, SYMADREM has decided to reinforce the monitoring system and to equip it with technologies able to early detect – in flood conditions – first signs of leakage, and to monitor their evolution. The technical solution proposed by EDF and geophyConsult and chosen by SYMADREM is based on passive optical temperature measurements. After presenting the objectives of the monitoring system and the main features of the reinforcement project, the general architecture of the monitoring system is presented. The position of the optical fiber is justified based on finite element numerical modelling of the water flows and the temperature field distribution in a vertical section representative of the dike, allowing i) to represent the defects that are targeted, ii) to simulate the influence of these defects on the parameters that control the internal flow parameters and the temperature in the structure and below and iii) to justify the ability of the method to detect the targeted defects. The main characteristics of the fiber optic monitoring system are then described, before a comprehensive feedback from the field is listed.

### **Références**

- Guidoux C., Courivaud J.-R., Beck Y.-L., Beguin R. (2015). 80 km cumulative dikes of canal equipped with fiber optic monitoring systems: site experience feedback on the 4 past years. TKZ2015, 29 Septembre 2015, Wierchomla, Poland
- Beck Y.-L., Courivaud J.-R., Guidoux C., Cassard A., Miceli J. (2015). Retour d'expérience de la surveillance d'ouvrages hydrauliques en terre de long linéaire par capteur à fibre optique. 25ème congrès des grands barrages, Stavanger, juin 2015, Q98 – R11

# **DIDRO, un outil intégré pour l'auscultation des digues par drone**

## ***DIDRO, an integrated tool for levees survey by drone***

**D. Boggio<sup>1</sup>, J-L. Sorin<sup>2</sup>, M. Pierrot-Deseilligny<sup>3</sup>,  
R. Tourment<sup>4</sup>, G. Rabatel<sup>5</sup>, R. Antoine<sup>6</sup>, E. VanLiempt<sup>7</sup>,  
J.-F. Biscay<sup>8</sup>, B. Albouze<sup>9</sup>**

<sup>1</sup> Geomatys, Arles, [david.boggio@geomatys.com](mailto:david.boggio@geomatys.com)

<sup>2</sup> IFSTTAR, Nantes, [jean-luc.sorin@ifsttar.fr](mailto:jean-luc.sorin@ifsttar.fr)

<sup>3</sup> IGN, Saint-Mandé, [marc.pierrot-deseilligny@ensg.eu](mailto:marc.pierrot-deseilligny@ensg.eu)

<sup>4</sup> IRSTEA, Aix-en-Provence, [remy.tourment@irstea.fr](mailto:remy.tourment@irstea.fr)

<sup>5</sup> IRSTEA, Montpellier, [gilles.rabatel@irstea.fr](mailto:gilles.rabatel@irstea.fr)

<sup>6</sup> CEREMA, Rouen, [raphael.antoine@cerema.fr](mailto:raphael.antoine@cerema.fr)

<sup>7</sup> Survey Copter, Pierrelatte, [edouard.vanliempt@survey-copter.com](mailto:edouard.vanliempt@survey-copter.com)

<sup>8</sup> Entente Valabre, Gardanne, [jf.biscay@valabre.com](mailto:jf.biscay@valabre.com)

<sup>9</sup> Atechsys Engineering, Pourrières, [benoit.albouze@atechsys.fr](mailto:benoit.albouze@atechsys.fr)

### **Résumé**

L'usage des drones se démocratise, ouvrant pour les gestionnaires de digues des perspectives de reconnaissance et d'auscultation de leurs ouvrages par voie aérienne à des coûts d'opération raisonnables. L'instrumentation de mesure se miniaturise, son coût diminue, et permet une vision globale et profonde des infrastructures, souvent au-delà de ce que peut détecter l'humain, ou avant que les conséquences d'une anomalie majeure ne soient visibles à l'œil nu. DIDRO est un *consortium* de chercheurs et d'industriels, réunis sous l'impulsion d'opérateurs de drones et de gestionnaires de digues. Trois ans de travaux ont permis de mettre au point des techniques d'acquisition d'image et d'interprétation des résultats pour l'aide à la détection de désordres sur les ouvrages. Le dispositif DIDRO fait intervenir deux vecteurs distincts pour deux types de mission différents, chacun répondant à un besoin spécifique. L'un, le drone patrouilleur, est un modèle de type avion à vitesse d'évolution élevée mais à charge utile limitée. Il se destine aux missions de diagnostic rapide à longue portée. L'autre, le drone hélicoptère, peut quant à lui embarquer une charge utile plus importante mais se déplace plus lentement. Il est indiqué pour les missions d'inspection approfondie.

Plusieurs capteurs ont été testés et les protocoles de mesure mis au point :

- le Lidar, très efficace pour repérer et localiser rapidement les mouvements horizontaux ou verticaux de terrain,
- la caméra thermique à haute définition, pour la détection de contrastes de température de plusieurs degrés,

- une caméra ultra-légère spécialisée en photogrammétrie.

En situation de crue, les informations fournies par le dispositif DIDRO permettent de dresser rapidement un état des lieux en cas d'anomalie sur un ouvrage, et sans nécessiter de déplacement d'une équipe sur place, dans des conditions qui l'exposeraient à un danger.

En période normale, l'acquisition de données dans le visible et l'infrarouge thermique HD par drone permet d'obtenir des informations sur la géométrie 3D des structures à haute définition et à bas coût. En comparant ces informations à des instants différents, il est également possible d'analyser l'évolution de cette géométrie, notamment dans les périodes de maintenance des structures. Enfin, ces données permettent de détecter des fuites et/ou certains défauts dans les structures.

La combinaison de l'ensemble de ces données en 3 dimensions dans un SIG (système d'Information Géographique) permet une visualisation aisée de la structure, facilitant ainsi l'analyse des informations, le diagnostic des experts et la prise de décision par les gestionnaires. Les opérations complexes de traitements colorimétriques, de corrections géométriques des prises de vue et d'analyse photogrammétrique sont automatisées, de façon à réduire au maximum la durée écoulée entre la prise de vue et la mise à disposition des résultats.

À l'issue de la phase de mise au point, l'enjeu maintenant pour DIDRO est la mise en place d'un véritable service de prestations opérationnelles à destination des gestionnaires de digues. De plus, une veille technologique permanente sera nécessaire pour intégrer les possibilités des nouveaux capteurs et des nouveaux vecteurs (drones volants) qui apparaissent sur ce marché d'avenir.

## **Abstract**

The use of unmanned aerial vehicles is becoming more accessible, opening the way for managers of levees to examine their structures by air at reasonable operating costs. Measurement instrumentation is becoming smaller and smaller, and allows a global and profound view of the infrastructures, often beyond what the human being can detect, or before the consequences of a major anomaly are visible to the human eye. DIDRO is a *consortium* of researchers and industrialists, brought together by drone operators and dike managers. Three years of work have allowed to select and adapt high-performance detection instruments and set up a decision making oriented analysis of the results. This communication presents the devices for acquiring data by drones, and decision support tools derived from data acquisition by drones. Two flying drones for professional use are evaluated and their characteristics compared, in order to establish the conditions of use and the type of equipment that they can embark. Sensors adapted to the auscultation of levees are also presented. The phenomena that they make it possible to highlight are described, as well as the protocols for acquiring measurements and analyzing the data collected. The equipped drone tool, combined with a digital business data analysis platform, is a valuable ally of the levee manager in collecting large-scale concordant information, enabling him to target sensitive areas of the structure.

# Mise en place et exploitation d'un système de surveillance et d'alerte des populations sur les digues du Sierroz

## *Refurbishment and Installation of a Monitoring and Early Warning System on the Sierroz Embankments*

R. Beguin<sup>1</sup>, J.-R. Courivaud<sup>2</sup>

<sup>1</sup> geophyConsult, 73000 Chambéry, [remi.beguin@geophyconsult.com](mailto:remi.beguin@geophyconsult.com)

<sup>2</sup> EDF-CIH, 73373 Bourget-du-lac, [jean-robert.courivaud@edf.fr](mailto:jean-robert.courivaud@edf.fr)

### Résumé

Les digues du Sierroz sont localisées en zone urbaine, dans la ville d'Aix-les-Bains (Savoie). Leur linéaire est de 400 m sur chaque rive. Ces digues protègent environ 900 habitants contre les crues du Sierroz. Les études hydrauliques réalisées dans le cadre du Plan de Prévention des Risques d'Inondation d'Aix-les-Bains ont montré que ces ouvrages ont un risque de rupture par surverse pour une crue centennale du Sierroz. Suite à ces résultats, la ville d'Aix-les-Bains a demandé à EDF-CIH de réaliser une étude de sureté, dans le but de déterminer les marges de sécurité de ces ouvrages pour chaque mode de rupture : surverse, érosion interne, glissement et liquéfaction. Cette analyse a confirmé que le risque principal était la rupture par surverse durant une crue. Ce diagnostic a conduit la ville d'Aix-les-Bains à lancer deux parades : (i) la réfection des digues dans le but de leur fournir une marge de sécurité satisfaisante pour une crue de période de retour 100 ans et (ii) un système de surveillance et d'alerte précoce capable d'alerter la population soumise au risque le plus tôt possible lorsqu'une brèche est imminente. L'objet de cette publication est la description du système de surveillance et d'alerte mis en place en 2015, ainsi que la présentation du retour d'expérience de son utilisation de 2015 à 2018.

Le dispositif d'auscultation est composé de poires d'alarmes pour la détection de niveaux d'eau de référence de la rivière ainsi que de piézomètres. Lorsque le niveau d'eau du Sierroz atteint un certain niveau (N1) la poire d'alarme se déclenche et entraîne l'envoi de SMS à l'équipe de surveillance en crue. Le personnel se rend alors sur les digues et débute une surveillance en continue durant tout l'épisode de crue. Cette surveillance consiste en une inspection visuelle continue de la crête et des talus amont/aval à la recherche de fuite, glissement, tassement ou surverse. Les niveaux piézométriques sont relevés régulièrement et comparés à des niveaux limites déterminés par un calcul de stabilité. Lorsqu'un risque de rupture imminent est identifié, l'équipe de surveillance déclenche l'alerte aux populations *via* une sirène sonore implantée sur le site et *via* un automate d'appel téléphonique qui contacte tous les riverains concernés. Ce dispositif de surveillance sur site a été mis

en œuvre lors d'une crue en juin 2016. Le retour d'expérience associé ainsi que les évolutions du dispositif envisagées pour améliorer sa robustesse sont décrites.

### **Abstract**

Sierroz embankment dikes are located in an urban area, in the city center of Aix-les-Bains (Savoie). The structure is 400 m long, on both rims of the river. Hydraulic and diagnosis studies have pointed out the risk of an overtopping failure for a 100-year return period flood event. Therefore, authorities took a two-step action : (i) a major reparation of the dikes, in order to provide a satisfactory safety margin for a 100-year return period flood and (ii) the set-up of a surveillance and warning system capable of alerting population as early as possible in case of an imminent breach. This publication presents the feedback of the installation and the use of the surveillance and warning system between 2015 and 2018.

The device comprises of a water level detector in the river and of piezometers. When the water level reaches a pre-defined threshold, SMS are sent to the monitoring team. The monitoring team goes on site and starts repeated monitoring and visual inspection. The visual inspection consists in inspecting the crest and the upstream / downstream slopes looking for leakage, sliding, settlement or overflow indicators. If an imminent risk of failure is identified, the monitoring team would alert the population *via* a sound siren installed on site and *via* an automated phone system which contacts the people previously registered. This on-site monitoring has been tested during a flood in June 2016. This experience of real-time monitoring during floods, when the definitive reinforcement of the structure is pending, illustrates the interest of combining solutions to better manage flood risk. It illustrates surveillance 3.0, which will combine reinforced structures and shared remote monitoring services. The latter can be supported by teams of specialists when contractors face up new and unforeseen situations.

# **De ScanPrint IMS à ALOHA V2018, histoire de transformation digitale pour la surveillance des endiguements CNR**

## ***From ScanPrint IMS to ALOHA V2018, a digitalization story for monitoring CNR dikes***

**P.-H. Faure<sup>1</sup>, L. Duchesne<sup>1</sup>,  
V. Morisseau<sup>2</sup>, J. Brossard<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> CNR, Lyon, [p.faure@cnr.tm.fr](mailto:p.faure@cnr.tm.fr)

<sup>2</sup> SIXENSE DIGITAL, Rueil Malmaison, [Vincent.morisseau@sixense-group.com](mailto:Vincent.morisseau@sixense-group.com)

### **Résumé**

Concessionnaire et aménageur du fleuve Rhône depuis 1933, CNR exploite, surveille et maintient 19 aménagements hydroélectriques au fil de l'eau sur un linéaire d'environ 600 km. L'ensemble du patrimoine se compose d'une cinquantaine d'ouvrages en béton et de près de 400 km d'endiguement en remblais. L'ensemble de l'auscultation et 90 % de la surveillance sont réalisées en interne par des équipes Mesures CNR territoriales et des équipes d'experts (Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques et Direction de l'Ingénierie). L'ensemble des ouvrages CNR est surveillé par 15 000 dispositifs d'auscultation dont 7 000 sont spécifiquement dédiés à l'auscultation des endiguements. Après des décennies de saisies des chroniques piézométriques sur papier, les mesures ont été progressivement saisies informatiquement. C'est en 2014, avec l'arrivée de nouveaux outils et de nouvelles technologies informatiques que CNR a engagé une véritable transformation digitale pour son processus de Surveillance *via* le projet ALOHA avec l'appui de SIXENSE Digital. Celle-ci s'est déroulée sur les 6 phases du projet entre mars 2014 et fin 2018.

Les principaux enjeux de cette transformation étaient :

- Fiabiliser et homogénéiser la mesure d'auscultation ;
- Améliorer le processus de mesures d'auscultation à l'aide d'outils adaptés aux besoins et ergonomiques ;
- Améliorer l'analyse des mesures ;
- Homogénéiser et faciliter les sorties graphiques ;
- Faciliter le suivi du comportement de l'ouvrage et la prise de décision ;
- Gagner du de temps ;
- Améliorer la maintenance et l'évolution des outils informatiques.

Afin de maîtriser les risques liés à l'adéquation métier/outil, CNR a décidé d'intégrer très fortement les utilisateurs dans le projet dès la phase de spécification

jusqu'à la mise en production.

Après une présentation rapide des principales fonctionnalités de l'outil ALOHA et plus particulièrement celles concernant les constats visuels, l'article présente les impacts sur le processus et les organisations. La dernière partie détaillera l'impact sur l'Humain et les outils mis en œuvre tout au long du projet afin d'éviter les écueils.



## Abstract

Operating more than 400 km of embankments on the Rhone Valley, CNR has been utilizing their expertise for 70 years to ensure optimal monitoring of its assets and assuring the safety of its works and of third parties.

Auscultation of CNR embankments is provided by 7,000 devices. These measures are complemented by regular visual inspections.

At the beginning of the 2000s, CNR first implemented a digital tool dedicated exclusively to the inspection of hydraulic structures and particularly for dikes.

At the turn of the 2013/2014 years, CNR began thinking about the implementation of new integrated and innovative systems. Assisted by a digital company (SIXENSE Digital), the process has been accompanied by an update of the business procedures because the working experience has evolved due to new technologies and digital tools.

The first step in 2016 was to implement and deploy the ALOHA tool, database for measurement and recording of the monitoring devices.

CNR wanted to continue the digital transformation by implementing a mobile tool to document the visual observations on site. This tool allows the teams in charge of the surveillance and the exploitation of the embankments to optimize the visual surveillance in the field, and it is used in the office by all those tasked with Safety.

The article describes the digital transformation initiated by CNR on the security process of containment, by addressing different topics: human (support to digital improvement), organizational (process review) and technical (functions developed, interfaces).



# Évaluation permanente de la sécurité des barrages, digues, réservoirs, voies navigables avec mesure par fibre optique

## *Permanent safety assessment of dams, levees, reservoirs, waterways with fiber optic distributed sensing*

V. Garau<sup>1</sup>, R. Blin<sup>2</sup>, D. Inaudi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TELEMAT SAS, Gretz-Armainvilliers, [vincent.garau@telemat.fr](mailto:vincent.garau@telemat.fr)

<sup>2</sup> SMARTTEC SA, Manno, Suisse, [regis.blin@smarttec.ch](mailto:regis.blin@smarttec.ch),  
[daniele.inaudi@smarttec.ch](mailto:daniele.inaudi@smarttec.ch)

### Résumé

L'instrumentation traditionnelle basée sur des capteurs ponctuels n'est pas toujours suffisante pour garantir la détection et la localisation des signes précoces d'apparition de dommages. La mesure de température et de déformation distribuée par fibre optique permet la détection précoce de discontinuités thermiques et structurelles locales le long de grandes structures, ainsi que leur localisation et dimensionnement. Ces discontinuités sont des indicateurs d'anomalies locales tels que les infiltrations, les fontis, les fissures et les tassements différentiels. De tels systèmes d'instrumentation fibre optique fournissent un flux de données continu d'une mesure par mètre sur toute la longueur du câble de détection. Un suivi permanent est essentiel pour constituer une base de données exhaustive de mesures en vue d'une évaluation plus approfondie. Les technologies les plus courantes de capteurs à fibre optique distribuée sont basées sur la rétrodiffusion Raman pour mesure des gradients de température et la rétrodiffusion Brillouin pour mesure des déformations relatives. L'analyse des données primaires basée sur le post-traitement des mesures de température ou de déformation distribuée a des limites et ne fournit pas d'informations en temps réel à l'opérateur, qui devient souvent débordé par la quantité de données qu'il reçoit. Un logiciel a été développé pour permettre une gestion robuste et automatique des données des systèmes de surveillance par fibre optique distribuée.

La détection de déformation et température par fibre optique distribuée constitue un outil puissant de surveillance de l'intégrité des digues et barrages. Telemac / Smartec fournit de tels systèmes depuis 15 ans. Nous présentons la complémentarité de l'instrumentation fibre optique avec les outils d'auscultation conventionnels, les composants du système de mesure fibre optique distribué, la méthodologie de mise en œuvre, des exemples de projet et les perspectives de cette technique.

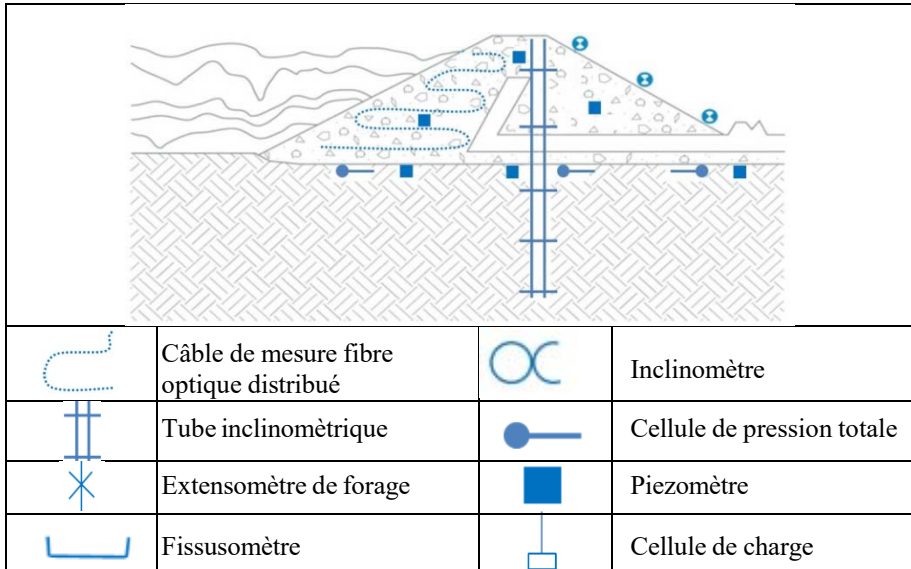


FIGURE 1: SCHEMA TYPE INSTRUMENTATION D'UN BARRAGE EN REMBLAIS

### Abstract

Fiber optic distributed temperature and strain sensing allows for early detection and localization of local thermal and structural discontinuities along large structures. Those discontinuities are indicators of local anomalies such as seepage, tunneling, sinkholes, cracks and differential settlements. Such systems provide a continuous data flow of one measurement every meter along the entire length of the sensing cable. Permanent monitoring is essential to build up an exhaustive measurement database as basis for further assessment.

# **Projet DIGUINTELLIGENT**

## **Recherche et développement d'une technologie de détection et de quantification d'écoulements dans les digues**

### ***“DIGUINTELLIGENT” Project***

### ***A new technology to detect and quantify flows within dikes***

**P. Chevrier<sup>1</sup>, P. Coudray<sup>2</sup>,  
P. Pezard<sup>3</sup>, D. Neyens<sup>4</sup>, J. Cousteau<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>EGIS, Montpellier, [paul.chevrier@egis.fr](mailto:paul.chevrier@egis.fr)

<sup>2</sup>KLOE, Montpellier, [coudray@kloe.fr](mailto:coudray@kloe.fr)

<sup>3</sup>CNRS, Montpellier, [ppezard@gulliver.fr](mailto:ppezard@gulliver.fr)

<sup>4</sup>ImagEau, Montpellier, [denis.neyens@imageau.eu](mailto:denis.neyens@imageau.eu)

<sup>5</sup>NGE, Tarascon, [jcousteau@nge.fr](mailto:jcousteau@nge.fr)

### **Résumé**

L'érosion interne, qui est définie comme l'entraînement progressif des particules constituant un ouvrage sous l'action de l'écoulement qui le traverse, est à l'origine d'un grand nombre de ruptures de digues. De 2012 à 2016, le projet DIGUINTELLIGENT a mis au point un système de surveillance des écoulements dans les ouvrages hydrauliques de type digue. Le système de surveillance visait notamment à réaliser un suivi intégré et continu de l'état hydrique des massifs, à localiser les écoulements anormaux et à tenter de quantifier les débits de fuite en temps réel.

Le projet vise plus largement à développer une stratégie opérationnelle de mesures intégrées permettant d'évaluer en temps réel les risques de rupture d'ouvrages, et à proposer une aide à la décision adaptée quant au déclenchement d'opérations de réparation. Le principe général est d'augmenter la réactivité des équipes de surveillance en cas de dysfonctionnement des ouvrages et de minimiser grandement les risques de rupture.

Le projet a consisté en la conception, le test sur un ouvrage expérimental et la validation d'un système innovant de surveillance d'une digue avec la conception d'un ensemble de capteurs expérimentaux parmi lesquels la fibre optique (réseaux de Bragg) pour la localisation des écoulements, des capteurs de potentiel électrique spontané (PES) pour la quantification des écoulements, la construction d'un site

d'expérimentation grandeur nature, la mise en place d'un protocole de tests et l'analyse des résultats.

Après avoir exposé les principaux enjeux et objectifs du projet, l'article présente la méthodologie appliquée pour la conception du démonstrateur (réalisation d'une digue « neuve » et d'une digue « ancienne »), et la conception de l'instrumentation mise en place (réseaux de fibres optiques, capteurs de potentiel électrique spontané (PES), mesures de résistivité électrique). Dans un second temps, le protocole expérimental et les différentes manipulations sont décrits, avant de présenter les résultats issus de l'interprétation des données acquises lors des tests et de conclure avec les perspectives se dessinant à l'issue de l'expérimentation.

## **Abstract**

Internal erosion, which is defined as the progressive dyke particles migration with a water flow, is at the origin of a significant number of dikes ruptures. From 2012 to 2016, the aim of the DIGUINTELLIGENT project, was to develop a new monitoring system for flows within dike-type hydraulic structures. This monitoring system was developed in particular to perform an integrated and continuous monitoring of the water state of the dikes, to locate the irregular flows and to attempt to quantify the leak rates in real time.

The project aimed to develop an operational system of integrated measurements in order to assess, in real time, the breaches risk of structures, and to propose a decision support to trigger repair operations. The general principle is to increase the monitoring teams reactivity in case of structures malfunction and to significantly reduce the failure risks.

The project included the design, testing on an experimental structure and the validation of an innovative dyke monitoring system through the design of a set of experimental sensors. These included optical fiber (Bragg gratings) for flow localization, self potential (SP) sensors for flow quantification, the construction of a pluri dm-scale experimental site, the implementation of a test protocol and the results analysis.

After presenting the main objectives of the project, this paper presents the methodology applied for the experimental structure design (joint construction of a "new" and "old" dyke), for the instrumentation design (optical fiber networks, self potential (SP) and electrical resistivity sensors). In a second part, the experimental protocol and the different field experiments are described, before presenting the results and concluding with future opportunities.

# **Apport du contrôle non destructif et de la fusion des données au diagnostic d'ouvrages hydrauliques en terre en environnement côtier**

## ***Contribution of non-destructive testing and data fusion on the diagnosis of coastal earth fill dikes***

**S. Gendrey<sup>1,2</sup>, V. Garnier<sup>2</sup>,  
P. Azemard<sup>1</sup>, C. Payan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Cerema Direction Méditerranée, Laboratoire d'Aix-en-Provence, Aix-en-Provence,  
[scarlett.gendrey@cerema.fr](mailto:scarlett.gendrey@cerema.fr)

<sup>2</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marseille,  
[vincent.garnier@univ-amu.fr](mailto:vincent.garnier@univ-amu.fr)

### **Résumé**

Le projet Digue 2020 a pour but d'améliorer la compréhension des phénomènes qui surviennent sur les ouvrages hydrauliques en terre (OHT) maritimes traités à la chaux grâce à la construction d'une plateforme de recherche *in situ* à taille réelle. Le projet Digue 2020 est financé dans le cadre du contrat plan État-Région PACA 2015-2020 et par le FEDER. Il bénéficie du soutien de l'Europe, de l'État, de la Région PACA, et du Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône. Il réunit les partenaires publics suivants : l'Irstea (coordinateur), l'Ifsttar, le Cerema, le laboratoire ESPACE (CNRS/Aix Marseille Université) et le Symadrem.

L'objectif de ces travaux est d'optimiser le diagnostic des OHT par l'analyse de méthodes de Contrôle Non Destructif (CND). En génie civil, la fusion de données issues de méthodes de CND donne des résultats prometteurs et nous proposons d'appliquer cette approche au diagnostic des OHT. Le diagnostic vise à détecter, caractériser et localiser deux types de défauts, connus pour être représentatifs des pathologies récurrentes aux OHT : les variations de densité (zones de vide ou de décompression, etc.) et les singularités (branches, réseaux enterrés, etc.). Leur détection et leur caractérisation sont les enjeux de ces travaux. Il s'agit plus particulièrement de caractériser les signatures de ces pathologies à partir de données mesurées par des méthodes de CND et par leurs combinaisons. Ces travaux ont pour but l'établissement et l'exploitation d'un catalogue de signatures représentatives des pathologies récurrentes aux OHT pouvant conduire à la rupture, dans le cas de matériaux traités à la chaux.

Les techniques de mesure de CND envisagées sont des méthodes géophysiques largement utilisées dans l'ingénierie d'auscultation des digues : la mesure de résistivité électrique, le radar géologique et la sismique. Des traitements des signaux et la fusion de données seront associés et optimisés pour l'exploitation des mesures. L'approche choisie s'appuie sur une étude en laboratoire dont l'objectif est la construction de modèles de conversion de paramètres observables (PO) en indicateurs. Les PO considérés sont la résistivité apparente, la vitesse des ondes de cisaillement, et la permittivité relative, car ils fournissent des informations complémentaires et non redondantes sur le matériau. Cette étude paramétrique permettra d'établir le catalogue en fonction des indicateurs que sont, la teneur en eau massique, la teneur en eau volumique, la masse volumique sèche apparente, rapportée à la masse volumique sèche à l'Optimum Proctor normal, à teneurs en chaux et en sels fixées. Ces modèles sont déterminés sur un ensemble d'éprouvettes caractérisées par des valeurs d'indicateurs qui décrivent les variations usuelles du matériau sur site. La fusion de données permet d'associer les PO issus de chacune des méthodes de CND. Cette démarche calibrée en laboratoire, pour un matériau, est éprouvée sur une planche d'essais, à l'échelle intermédiaire, par l'introduction de singularités. Elle sera ensuite recalée *in situ* sur la plateforme de recherche expérimentale.

### **Abstract**

The Digue 2020 project intends to improve the understanding of long-term ageing phenomena on earth fill dikes through the construction of a full scale research platform consisting of natural materials and lime treated materials.

In Civil Engineering, data fusion of non-destructive methods shows promising results. This work aims to transfer these approaches to the diagnosis of coastal earth fill dike using data combination. Diagnosis of coastal earth fill dike aim for tracking, characterising and locating two recurring defects: density variations (void areas, decompression, etc.) and singularities (branches buried networks). More specifically, to characterise the pathology signatures using the combination of several non-destructive methods and build a signature catalogue.

Our methodology is based on a laboratory study whose objective is to build conversion models of observable parameters to indicators. The observable parameters considered are the apparent resistivity, the shear wave velocity, and the relative permittivity. This parametric study establishes the catalogue depending on mass water content, volumetric water content, bulk dry density referenced to bulk dry density at normal Proctor Optimum at fixed lime and salt content. The data combination enables the association of different observable parameters

Ranging from the laboratory to a full scale research platform, our methodology should ultimately rise to an improved diagnosis method, thus contributing to a better understanding of long-term ageing phenomena on earth fill dikes.

# Thème 6

## Aide à la décision – systèmes : analyses de risque, analyses coûts/bénéfice, analyses multicritères

### Comité scientifique

#### *Animateurs de la session orale :*

Marc Vuillet

EIVP

Rémy Tourment

Irstea Aix-en-Provence

#### *Relecteurs :*

Marc Vuillet (*Coordinateur*)

EIVP

Gérard Degoutte

CTPBOH

Rémy Tourment

Irstea Aix-en-Provence





# **L'analyse de risque des systèmes endigués : méthodologie et application à la réalisation des études de dangers**

## ***Risk analysis of leveed systems: methodology and application to conducting hazard studies***

**R. Tourment<sup>1</sup>, B. Beullac<sup>1</sup>,  
S. Patouillard<sup>2</sup>, J. Maurin<sup>3</sup>, Y. Queffélec<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Irstea, Aix en Provence, [remy.tourment@irstea.fr](mailto:remy.tourment@irstea.fr)

<sup>2</sup> DREAL Centre Val de Loire, Orléans,

[sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr](mailto:sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr)

<sup>3</sup> Expert consultant, Saint Denis de l'Hôtel, [jean.maurin45@gmail.com](mailto:jean.maurin45@gmail.com)

<sup>4</sup> ONF-DFRN / Dép. RN –Pôle RTM, Gap, [yann.queffelec@onf.fr](mailto:yann.queffelec@onf.fr)

### **Résumé**

Les études de dangers (EdD) de digues ont été introduites par la réglementation de 2007 sur la sécurité des ouvrages hydrauliques ; la réglementation de 2015 a défini les études de dangers des systèmes d'endiguement (arrêté de 2017). Ces études de dangers suivent une démarche d'analyse de risque mais dans un format particulier, imposé par la réglementation. Pour autant, l'adaptation des concepts de l'analyse de risque, qui ont été développés dans le domaine de l'industrie, au domaine des ouvrages hydrauliques n'était pas chose évidente. En effet, si pour les barrages, ouvrages "ponctuels", cette adaptation a déjà demandé un travail conséquent, pour les digues, compte tenu de la grande complexité des systèmes qu'elles forment (notamment du fait de la diversité des ouvrages qui s'organisent en systèmes à longs linéaires, et de la souvent grande hétérogénéité et méconnaissance structurelle de ces ouvrages), les besoins en développements méthodologiques se sont avérés bien plus importants encore.

Un cadre général de l'analyse du risque inondation des systèmes endigués a été produit au niveau international dans le cadre de la rédaction de l'International Levee Handbook (2010-2013). En parallèle, Irstea a développé, en collaboration avec plusieurs gestionnaires de digues, une méthodologie de réalisation des études de dangers fondée sur l'analyse de risque ainsi qu'une méthode d'analyse des modes de défaillance permettant de structurer l'activité de détermination des scénarios de défaillance des systèmes de protection contre les inondations. Cette méthodologie a été mise en œuvre sur plusieurs dizaines de systèmes de protection. Un guide de réalisation de ces études a été rédigé et publié à la fin de l'année 2018.

L'article présente successivement :

- Les principes généraux de l'analyse de risque appliquée aux digues et systèmes de protection contre les inondations,
- La méthodologie développée par Irstea pour l'analyse de risque de ces systèmes,
- La méthode d'analyse des modes de défaillance hydrauliques et structurels de ces systèmes, et son utilisation dans l'analyse de risque.

Dans une dernière partie, l'article détaille l'application pratique de ces méthodes pour la réalisation d'une étude de dangers réglementaire, y compris :

- L'analyse de risque comme support à la décision,
- Les différents contextes de réalisation des EdD,
- Le contexte de l'introduction de la compétence GEMAPI (choix du niveau de protection et des limites du système d'endiguement et de la zone protégée, problématiques liées aux différentes maîtrises d'ouvrage),
- L'intérêt de ces études pour les gestionnaires de digues et pour les autres acteurs.

### **Abstract**

Levees hazard studies were introduced by the 2007 regulations on the safety of hydraulic structures. These studies are applied to levee systems since the publication of the decree of 12 May 2015. They are risk analyzes in a particular format, defined by the regulations. The paper presents a method for carrying out hazard studies of levee systems based on risk analysis. It describes the specific risk analysis method developed for these systems and the associated method for analyzing failure modes. Finally, it presents the interest of using risk analysis independently of a fluctuating regulatory framework, for the continuous improvement of protection structures, the systems they form and their management.

# **Guide et cahier des charges pour la réalisation des études de dangers de système d'endiguement**

## *Guide and technical specifications for carrying out levee system hazard studies*

**P. Ledoux<sup>1</sup>, Y. Deniaud<sup>2</sup>, C. Cambefort, B. Colin,  
C. Trmal, R. Tourment, B. Beullac**

<sup>1</sup> Cerema, Aix-en-Provence, [patrick.ledoux@cerema.fr](mailto:patrick.ledoux@cerema.fr)

<sup>2</sup> Cerema, Brest, [Yann.Deniaud@cerema.fr](mailto:Yann.Deniaud@cerema.fr)

### **Résumé**

À la demande du ministère de la Transition Écologique et solidaire, le Cerema a rédigé un document technique pour la réalisation des études de dangers de systèmes d'endiguement. Ce document est à destination des gestionnaires de ces ouvrages qui, dans de nombreux cas, sont des entités nouvellement créées par la GEMAPI. En outre, l'ouvrage s'accompagne d'un document complémentaire proposant une aide pour l'élaboration d'un cahier des charges technique en vue de la réalisation des études de dangers. L'ensemble a vocation à constituer un référentiel d'accompagnement précieux pour la consolidation des compétences des nouveaux gestionnaires de système d'endiguement. Après avoir indiqué les objectifs du document et rappelé le contexte réglementaire régissant les EDD, l'article développe les sujets suivants :

- qu'est-ce qu'une EDD et à quoi sert-elle ?
  - les concepts d'une EDD appliquée aux systèmes d'endiguement,
    - le niveau de protection,
    - le niveau de sûreté,
    - le niveau de danger,
    - les niveaux de sécurité,
    - les liens entre ces différents niveaux, voir figure 1 ;
  - le gestionnaire premier bénéficiaire mais pas le seul, car les informations tirées de l'étude et notamment du résumé non technique intéressent les responsables locaux intéressés par la sécurité civile et les personnes présentes dans la zone protégée ;
  - l'évaluation des venues d'eau dangereuses et la caractérisation du niveau de sécurité dans la zone protégée qui doit être effectuée et présentée afin qu'elle soit facilement utilisable pour la gestion de crise ;
- comment réaliser une EDD ?
  - une démarche de connaissance à organiser pour laquelle une assistance à

- maîtrise d'ouvrage est recommandée,
  - des étapes incontournables,
  - des outils à utiliser de manière proportionnée ;
    - les données topographiques,
    - les études hydrauliques,
    - la modélisation mécanique et géotechnique ;
- l'EDD n'est pas qu'un dossier réglementaire, les recommandations de l'organisme agréé lui permettent notamment d'optimiser son exploitation du système d'endiguement ;
- le contenu du cahier des clauses techniques particulières :
  - éléments de contexte : objet du CCTP, contexte réglementaire et description du site d'étude,
  - contenu des études : principes généraux, données d'entrée et études spécifiques à mener,
  - déroulement de l'étude : pilotage, phasage et délai, réunions de suivis et rendus,
  - données fournies au démarrage des études.

### **Abstract**

At the request of the French Ministry of Ecological and Solidarity Transition (MTES), Cerema wrote a technical document that aims to give explanation on how to carry out risk studies of levee systems. This document is intended for the levee managers, which in many cases are new entities created by the new GEMAPI regulation. In addition to this first document, a complementary handbook aims to help for the elaboration of technical specifications for carrying out hazard studies. After outlining the objectives of the technical document and explaining briefly the regulatory context governing the risks studies of levee systems, the article develops the following topics.

- what is levee system hazard study and what is it for?
  - The concepts of risks studies applied to levee systems,
  - the beneficiaries : managers but not only them,
  - the evaluation of hazardous water inflow and characterization of the level of safety in the protected area;
- how to achieve a risks study ?
  - a process of deepening and classifying the knowledge to be organized,
  - the essential steps,
  - tools to be used in a proportionate way;
- a regulatory document but not only;
- the content of the technical specifications for the risks study of a levee system.

# Spécificités des systèmes d'endiguement et de l'analyse de risque en contexte torrentiel

## *Specificities of embankment systems and risk analysis in torrential context*

Y. Queffélec<sup>1</sup>, S. Carladous<sup>1</sup>, G. Piton<sup>2</sup>, D. Kuss<sup>3</sup>,  
M. Fouquet<sup>3</sup>, R. Tourment<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ONF / DFRN / Département Risques Naturels – Pôle RTM, Grenoble,  
[yann.queffelec@onf.fr](mailto:yann.queffelec@onf.fr)

<sup>2</sup> Univ. Grenoble Alpes, IRSTEA – UR ETNA - Centre de Grenoble,  
[guillaume.piton@irstea.fr](mailto:guillaume.piton@irstea.fr)

<sup>3</sup> ONF / Services Départementaux RTM de l'Isère et des Hautes-Alpes,  
[damien.kuss@onf.fr](mailto:damien.kuss@onf.fr)

<sup>4</sup> IRSTEA – UR RECOVER - Centre d'Aix-en-Provence, [remy.tourment@irstea.fr](mailto:remy.tourment@irstea.fr)

### Résumé

Lorsqu'ils sont situés en bordure de torrents ou de rivières torrentielles, les systèmes d'endiguement sont soumis à des aléas naturels violents caractérisés par un fort transport solide (charriage, voire laves torrentielles). Ces phénomènes torrentiels sont susceptibles de provoquer des évolutions morphologiques majeures du lit durant les crues et sur ses berges en cas de débordements. L'analyse de risque à mener dans le cadre des études de dangers doit prendre en compte ces spécificités du contexte torrentiel. Cet article vise ainsi à : 1) présenter les modalités spécifiques d'évaluation des aléas torrentiels ; 2) décrire et illustrer les modes de rupture des digues torrentielles ; 3) présenter les différences fondamentales des potentiels de danger en cas de rupture ; 4) proposer une approche adaptée d'analyse de risque.

1) Dans les cours d'eau torrentiels, les évolutions morphologiques modifient fortement les conditions d'écoulement et rendent souvent inopérantes les approches hydrauliques classiques et l'utilisation de modèles numériques 2D à géométrie fixe. Les approches expertes basées sur les analyses historiques et géomorphologiques et les retours d'expériences restent indispensables pour bien comprendre les phénomènes, qualifier les aléas et définir les scénarios de crue et de défaillances les plus probables. Elles s'appuient notamment sur les étapes incontournables que constituent l'analyse du (des) profil(s) en long et les reconnaissances de terrain. Les méthodes les plus adaptées pour évaluer les conditions d'écoulement dans le chenal endigué sont présentées dans l'article, ainsi que les limites actuelles de l'appréciation des aléas en dehors de son lit ordinaire.

2) Les différents mécanismes de défaillance sont passés en revue et illustrés par des exemples, afin de déterminer les modes de rupture prépondérants. De ce point de

vue, les érosions externes et les affouillements des ouvrages par les cours d'eau torrentiels sont de loin ceux qui prédominent.

3) En cas de rupture, les spécificités des potentiels de danger de digues torrentielles par rapport aux digues fluviales sont présentées, en faisant la distinction entre les digues situées en bordure de torrents ou de rivières torrentielles.

4) Dans un contexte torrentiel où de nombreux paramètres ne sont pas maîtrisés ou maîtrisables, il paraît très difficile, voire impossible, de donner une probabilité chiffrée de rupture de digue. On privilégie alors, pour l'analyse de risque, une approche d'évaluation qualitative de cette probabilité, basée sur le croisement des niveaux de contraintes et de résistance. Ces derniers sont évalués pour chaque tronçon de digue homogène et chaque mode de rupture. Nous proposons enfin une approche "sécuritaire" pour analyser les conséquences des débordements sur la zone protégée. Elle consiste à délimiter les zones maximales d'extension des crues, à partir de la démarche de qualification et quantification des aléas développée dans le guide PPRN « cours d'eau torrentiels ».

Dans l'état actuel des connaissances, de nombreuses difficultés persistent pour quantifier précisément les phénomènes et leurs conséquences. Cela met en évidence l'adaptation nécessaire, ou du moins l'interprétation pragmatique, qu'il faut avoir des textes réglementaires en contexte torrentiel. Cela concerne notamment le contenu des études de dangers qu'il convient de simplifier selon le contexte (notamment en bordure de torrents) et selon l'importance du système d'endiguement (en particulier pour les digues de classe C, majoritaires en zone de montagne).

### **Abstract**

When located along torrents or torrential rivers, embankment systems experience violent natural hazards characterized by intense sediment transport (bedload or even debris flows). These torrential phenomena are likely to cause significant morphological evolutions of the bed during the floods - and of the river banks in case of overflows. The latter are related to streambed displacements, accretions, erosions or/and woody debris which strongly modify the flow conditions. Conventional hydraulic approaches and the use of 2D numerical models are often inoperative because they do not take into account these evolutions. Expert approaches based on historical, geomorphological analysis and lessons learned from past disasters, are essential to understand phenomena and qualify the related hazards, taking into account: analysis of bed longitudinal profile(s) and field reconnaissance. The most proven methods for assessing flow conditions in embanked channels are presented, as well as current limits for assessing hazards outside of the regular bed.

The different dike failure modes are reviewed. External erosions and scouring of structures remain by far the predominant degradation mechanisms of torrential dikes. Finally, the specificities of the hazard potentials of torrential dikes compared to river dikes are presented, as well as elements on risk analysis and assessment.

To assess the consequences of overflows towards the protected area, a "safe" approach is proposed. It consists in delimiting maximum areas of flood extension based on an approach similar to the one described in the guide on "torrential stream" natural hazard prevention plans.

# **La modélisation hydraulique 2D globale dans le cadre d'un programme de fiabilisation des levées : exemple des vals de l'Orléanais**

## ***The large-scale 2D hydraulic modelling used as part of a levees work program: example of valleys of Orleans***

**L. Cuvillier<sup>1</sup>, A. Bontemps<sup>1</sup>, S. Braud<sup>2</sup>, S. Patouillard<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Cerema Normandie-Centre, Blois, France, [arnaud.bontemps@cerema.fr](mailto:arnaud.bontemps@cerema.fr)

<sup>2</sup> DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France,  
[sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr](mailto:sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr)

### **Résumé**

Le val d'Orléans est l'une des plus importantes zone endiguée de la Loire, en termes de surface, de linéaire de digues et d'enjeux socio-économiques. Le programme de fiabilisation des levées protégeant cette zone est essentiellement basé sur l'étude de dangers (EDD) du val d'Orléans et la démarche « Etude des vals de l'Orléanais – ECRIVALS ». Outre les travaux d'amélioration du niveau de sûreté, il prévoit la réalisation de tronçons résistants à la surverse, le rehaussement ponctuel de digues pour empêcher la surverse lors de crues de faible période de retour et enfin, un réajustement de l'altimétrie du déversoir de Jargeau.

Dans ce cadre et afin de mieux appréhender le fonctionnement de cette zone endiguée, la DREAL Centre-Val de Loire a sollicité le Cerema afin de réaliser une modélisation hydraulique en deux dimensions (2D), de façon globale, en intégrant le lit mineur, le lit majeur et les digues. Pour évaluer les interactions hydrauliques entre les différentes zones endiguées du secteur, le modèle inclut également des vals situés en amont ainsi que l'ensemble des vals possédant tout ou partie de leur système d'endiguement en face de celui d'Orléans.

L'objet du présent article est de réaliser un retour d'expérience sur la construction de ce modèle et sur ses apports pour comprendre le fonctionnement du système endigué d'Orléans et ses interactions avec les systèmes limitrophes. *In fine*, l'objectif de cet outil est de fournir une aide au gestionnaire pour définir et dimensionner les aménagements à prévoir sur le système.



FIGURE 3 - DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE ET DES DIFFERENTS SYSTEMES D'ENDIGUEMENT LA COMPOSANT (Source: Scan 100® – IGN©)

Trois aspects sont développés : d'abord, un bilan des apports/limites du nouveau modèle 2D étendu en comparaison avec la solution retenue pour l'EDD qui consistait à représenter les vals en 2D, le lit mineur en 1D et à coupler ces deux outils. La méthode d'identification des zones de surverse par-dessus les levées, enjeu clef de ce nouveau modèle, est présentée dans un second temps. Enfin, sont abordées les perspectives d'utilisation du modèle pour prendre en compte l'évolution morphologique de la Loire liée à sa dynamique fluviale (développement de la forêt alluviale et l'évolution topographique du lit). L'objectif est d'évaluer la pérennité et la sensibilité à moyen terme des aménagements envisagés.

### Abstract

With more than 50 000 inhabitants protected, the Orleans levee system is one the most important of all Loire valley, in terms of areas, of dike length and of economic issues. The risk assessment study named « Etudes de dangers » and the « ECRIVALS » [3] approach showed the need to reduce the hazard of dikes breaching during an exceptional flood.

In order to reduce flood hazards, a levee improvement program is being developed. Three possible improvements are considered: increasing the resistance to overflowing of some levee sections, raising low levee sections to prevent overflowing and resizing the spillway crest of Jargeau.

In order to quantify and qualify the dike development program, a 2-dimensional hydraulic model was developed by the Cerema, including floodplains, levee system and main channel. It allows describing flows within zones protected by the levee system.

This article presents a feedback from the construction of this model. This feedback focuses on three main aspects: Firstly, a balance assessment of the contributions/limits of this extended model is made with regard to the previous tools. Secondly, a specific focus on the characterization of overtopping is realized. Finally, a perspective on the morphological evolution of the Loire River is given. The aim is to assess the medium term longevity and sensitivity of the suggested improvements.



# Études de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux dans le delta du Rhône

## *Hazards studies of river levees systems in the Rhône Delta*

T. Mallet<sup>1</sup>, C. Dast<sup>1</sup>, M. Requi<sup>1</sup>, S. Chardès<sup>1</sup>,  
A. Castagnet<sup>1</sup>, J.J. Fry<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SYMADREM, Arles, [thibaut.mallet@symadrem.fr](mailto:thibaut.mallet@symadrem.fr)

<sup>2</sup> EDF-CIH, Le Bourget du Lac, [jean-jacques.fry@edf.fr](mailto:jean-jacques.fry@edf.fr)

### Résumé

Les études de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux dans le delta du Rhône, s'inscrivent dans le cadre de la nouvelle réglementation liée aux digues de protection (décret digues de 2015 et arrêté études de dangers de 2017) et du programme de travaux porté dans le cadre du Plan Rhône par le SYMADREM [1]. Ces études portent sur l'ensemble des ouvrages constituant les systèmes (225 km de digues,

350 ouvrages hydrauliques (vannes, écluses) et 30 batardeaux manœuvrables en crue). Les zones protégées par ces systèmes couvrent une superficie de 1500 km<sup>2</sup>, où vivent plus de 115 000 personnes. La méthodologie mise en œuvre s'est inspirée du modèle Source/Pathway/Receptor utilisé dans l'International Levee Handbook et des recommandations de l'USBR en matière de bonnes pratiques.

Quatre scénarios d'inondation, en provenance du système d'endiguement, ont été abordés. Trois concernent les risques incrémentaux (brèche avant surverse ; brèche après surverse ; défaillance des ouvrages traversants) et un scénario traite du risque lié à la surverse sans brèche.

Pour la caractérisation des risques, un modèle probabiliste a été mis en œuvre. Ce choix a été motivé par la facilité d'identification du caractère probabiliste de l'aléa crue (données depuis 1816). Il a été renforcé par la grande hétérogénéité, des faciès géotechniques rencontrés, à la fois au cœur des remblais, due aux différentes étapes de construction des digues (effet mille-feuilles) mais également dans leur fondation, due aux multiples changements de tracés du Rhône dans son histoire. Cette hétérogénéité rend illusoire le caractère déterministe d'un facteur de sécurité.

Cinq modèles respectivement géométrique, hydraulique, morphodynamique, géotechnique et fonctionnel ont été élaborés pour évaluer les risques liés aux treize scénarios de brèche définis à partir de l'étude accidentologique. Pour chaque profil de digue espacé de 125 m, des courbes de fragilité ont été construites et ont permis de déterminer les quatre niveaux caractéristiques des ouvrages (protection, sûreté, danger et submersion). Des scénarios d'inondation, par brèche quand le niveau de

sûreté était dépassé ou sans brèche quand ce dernier n'était pas dépassé, ont été modélisés pour déterminer les niveaux de protection au sein de la zone protégée et la dangerosité des venues d'eau au-delà du niveau de protection. L'article conclut sur la phase indispensable d'appropriation, (en cours) par les autorités compétentes en matière de gestion de crise, des résultats de l'étude. Elle met en exergue la difficulté d'évacuer massivement les populations de manière préventive pour des occurrences fréquentes de crues (10 à 20 ans) et justifie *a posteriori* le programme de travaux, qui vise à garantir une protection minimale de 100 ans de la zone protégée, la résistance des ouvrages jusqu'à une crue de 800 ans et amener la probabilité annuelle de brèche en dessous du seuil d'acceptabilité fixé à  $10^{-4}$  par le SYMADREM.

### Abstract

Hazards studies of river levees systems in the Rhone delta are part of the new "levees" regulation of 2015 and the program of works carried out by SYMADREM [1]. These studies concern all the structures constituting the systems (225 km of levees, 350 hydraulic structures and 30 closing gates maneuverable in flood). The areas protected by these systems cover an area of 1 500 km<sup>2</sup>, where 115 000 people live. The methodology used was based on the Source / Pathway / Receptor model used in the International Levee Handbook and the USBR best practices.

Four inundation scenarios from the levees system were studied. Three are related to incremental risks (breach before overflow, breach after overflow, failure of crossing structures) and one scenario deals with overflow without breach.

For risk assessment, a probabilistic model was implemented. This choice was motivated by the easing identification of the probabilistic nature of the hazard (data since 1816). It was reinforced by the heterogeneous facies of the levees, due to the successive stages of their construction and the heterogeneities of their foundations due to multiple changes of the Rhône bed. This heterogeneity makes the deterministic approach of a safety factor illusory.

Five geometric, hydraulic, morphodynamic, geotechnical and functional models were respectively used to assess the risks associated with the 13 breach scenarios defined from the accidentology study. For each levee profile spaced from 125 m, fragility curves were defined and allowed to determine the four characteristic levels of structures (protection, safety, danger and overflow). Inundation scenarios were simulated with breach, when the safety level was exceeded or without breach when it was not exceeded, to determine the levels of protection within the protected area and the danger of water inflows beyond the level of protection.

The paper concludes on the essential phase of appropriation of the results of the study (in progress) by the authorities in charge of crisis management. It highlights the difficulty of mass evacuations of the populations for a frequent occurrence of floods (10 to 20 years) and justifies *a posteriori* the work program, which aims to guarantee a minimum protection of 100 years of the cities, the resistance of structures to a flood of 800 years and bring the annual probability of breach below the threshold of acceptability set at  $10^{-4}$  by SYMADREM.

# Devenir de la digue maritime d'Erromardie (Saint-Jean-de-Luz)

## *The future of Erromardie's sea dyke (Saint-Jean-de-Luz)*

**E. Tena<sup>1</sup>, A. De Bonviller<sup>2</sup>,  
B. Martinez<sup>3</sup>, C. Huveteau<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> ISL-Ingénierie, Saint-Jean-de-Luz, [tena@isl.fr](mailto:tena@isl.fr)

<sup>2</sup> ISL-Ingénierie, Angers, [bonviller@isl.fr](mailto:bonviller@isl.fr),

<sup>3</sup> Mairie de Saint-Jean-de-Luz, [bruno.martinez@saintjeandeluz.fr](mailto:bruno.martinez@saintjeandeluz.fr)

<sup>4</sup> EPCI Basque, [c.huveteau@communaute-paysbasque.fr](mailto:c.huveteau@communaute-paysbasque.fr), [c.sarrade@communaute-paysbasque.fr](mailto:c.sarrade@communaute-paysbasque.fr)

### Résumé

La digue d'Erromardie est un ouvrage de défense contre la mer située sur la commune de Saint-Jean-de-Luz. Elle est composée, côté plage, de murs d'une hauteur apparente variable de 1 à 2 mètres. Réalisés en béton cyclopéen sur une assise béton d'environ 30 cm d'épaisseur coulée en pleine fouille. L'épaisseur en tête varie de 0,6 à 1,0 m avec un léger fruit sur la face vue (côté plage). La population de la zone protégée est inférieure à 1 000 personnes.

La digue assure 3 fonctions principales, route littorale, protection contre l'érosion et protection contre les aléas hydrauliques (débordement et franchissement de paquet de mer). Pour ce type d'ouvrage, l'événement à considérer est une tempête avec concomitance de fortes houles, dépressions atmosphériques et grandes marées.

L'objectif de protection de la digue d'Erromardie est de se prémunir contre l'intrusion d'eau dans une zone protégée (aléa hydrauliques). A ce titre, l'objectif de protection est double, d'une part d'empêcher le passage continu (submersion niveau statique) des eaux marines vers l'intérieur de terres (zone protégée), d'autre part de protection contre les vagues (niveau dynamique). ISL a réalisé l'étude de danger de l'ouvrage qui a conduit à prescrire des travaux importants pour atteindre un niveau de sécurité satisfaisant compte tenu des enjeux.

Dans le même temps, ISL a établi pour le compte de l'Agglomération Sud Pays Basque la stratégie du trait de cote du Pays Basque qui n'a pas écartée le recours à une stratégie de repli dans le secteur concerné.

Enfin, une étude relative à l'aménagement durable des stations du littoral du pays basque a apporté un éclairage complémentaire. Le devenir de la digue est discuté à la lumière des conclusions de ces 3 études.



FIGURE 1: VUE AERIENNE DE LA DIGUE D'ERROMARDIE (SAINT-JEAN-DE-LUZ)

### **Abstract**

The Erromardie dyke is a sea defense structure located in the municipality of Saint-Jean-de-Luz. It is composed, on the beach side, of walls with an apparent height varying from 1 to 2 meters. Made of cyclopean concrete. A concrete base of about 30 cm thick poured in the middle of the excavation. The head thickness varies from 0.6 to 1.0 m with a slight fruit on the front sight (beach side). The population of the protected area is less than 1,000 people.

The dyke performs 3 main functions, coastal road, protection against erosion and protection against hydraulic hazards (overflow and sea-package crossing). For this type of structure, the event to be considered is a storm with concomitant heavy swells, atmospheric depressions and high tides.

The objective of protecting the Erromardie dyke is to protect against water intrusion into a protected area (hydraulic hazard). As such, the protection objective is twofold, on the one hand to prevent the continuous passage (static level submersion) of marine waters inland (protected area) and on the other hand to protect against waves (dynamic level).

ISL carried out the hazard study of the structure, which led to the prescription of major works to achieve a satisfactory level of safety in view of the stakes.

At the same time, ISL established on behalf of the South Basque Country Agglomeration the strategy of the Basque Country's coastline, which did not rule out the use of a withdrawal strategy in the sector concerned.

Finally, a study on the sustainable development of coastal stations in the Basque Country provided additional insight.

The fate of the dyke is discussed in the light of the conclusions of these 3 studies.

# Thème 7

## Confortement et travaux sur les digues et ouvrages associés

### Comité scientifique

#### *Animateurs de la session orale :*

Christophe Delaunay	SCP
Jean-Marc Flohr	EGIS
Thibaut Mallet	Symadrem
Akim Salmi	ISL

#### *Relecteurs :*

Thibaut Mallet ( <i>Coordinateur</i> )	Symadrem
Olivier Bory	CFBR / EDF Savoie Technolac
Christophe Delaunay	SCP
Laurence Duchesne	CNR
Jean-Marc Flohr	EGIS
Yann Queffelec	ONF / RTM
Akim Salmi	ISL



# Ouvrages de Protection contre les Crues à Sallèles d'Aude

## *Flood protection works in Sallèles d'Aude*

A. Plastre<sup>1</sup>, G. Thouvenin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> France MACCAFERRI, Valence, [A.Plastre@maccaferri.com](mailto:A.Plastre@maccaferri.com)

<sup>2</sup> ARTELIA Ville et Transport, Toulouse, [guillaume.thouvenin@arteliagroup.com](mailto:guillaume.thouvenin@arteliagroup.com)

### Résumé

L'article s'intéresse aux travaux de construction d'ouvrages de protection contre les crues à Sallèles d'Aude (11) - commune particulièrement exposée aux crues de la Cesse et de l'Aude - réalisés au cours de l'année 2017. Les ouvrages de protection existants ont montré leurs limites lors de la crue de Novembre 1999, qui a provoqué d'importants dégâts sur la commune.

Le Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique (SIAH) du Minervois, en qualité de Maître d'Ouvrage (devenu depuis Syndicat Mixte Aude Centre), a programmé la réalisation de nouveaux ouvrages de protection contre les crues de la Cesse (protection centennale) et de l'Aude (protection 1999) ; ils remplacent les digues existantes situées au Sud du village. Les ouvrages ont été conçus au stade Projet par ARTELIA (Maître d'œuvre), et réalisés par le Groupement CAZAL-LAVOYE, l'opération ayant été financée par l'État, la Région Occitanie, les Départements de l'Aude et de l'Hérault, et le Syndicat Mixte Aude Centre. La conduite d'opération générale est assurée par le SMMAR, en qualité d'Assistant à Maîtrise d'Ouvrage (AMO).

Les aménagements concernent une digue de protection de 1680 m, quatre ouvrages de rétablissement pluvial, deux bassins de rétention, un poste de pompage, trois rétablissements routiers et quelques travaux annexes. L'article porte plus spécifiquement sur la conception et la réalisation de la digue de protection qui présente la particularité de pouvoir déverser sur l'ensemble de son linéaire. Elle est constituée d'un dispositif anti fouisseur sur l'amont, d'une clé d'ancrage en matériaux peu perméables, d'une poutre sommitale en béton assurant les fonctions de calage du niveau de déversement et d'écran parafouille, et d'un coursier incliné en matelas gabions de type Reno pour résister aux vitesses et contraintes hydrauliques en cas de surverse (Fig. 1).

L'article présente les différentes étapes de la conception et de la réalisation, en discutant des différents choix techniques concernant la nature de l'ouvrage, le choix des matériaux et en apportant des éclairages sur la mise en œuvre.

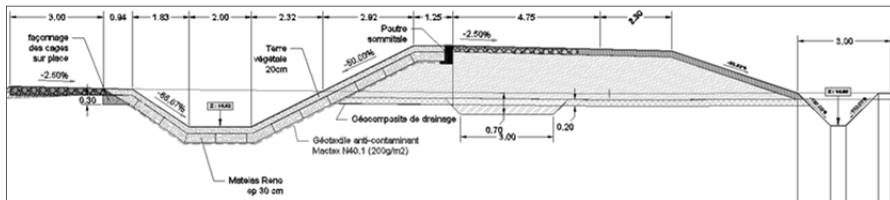


FIGURE 1 : COUPE TYPE DE LA DIGUE, AVEC FOSSE DE DISSIPATION AVAL

La technique gabion est largement utilisée pour ce type d'ouvrages durant les dix dernières années en France, est de plus en plus employée en substitution à des techniques plus traditionnelles. En effet elle constitue une solution technique et économique capable de résister à des vitesses d'écoulement de l'ordre de 6 m/s, facile d'installation et dont l'entretien et la maintenance sont limités.

La méthode de justification de la résistance des matelas gabions est développée dans l'article, en se basant sur l'équation de l'écoulement graduellement varié qui permet de déterminer la forme de la ligne d'eau le long du déversoir et de définir les vitesses et contraintes hydrauliques appliquées sur les structures en gabions. La résistance des structures est justifiée sur la base d'essais expérimentaux réalisés à l'université du Colorado à Fort Collins sur un canal incliné revêtu de matelas Reno à échelle 1.

La fourniture et la mise en œuvre de ces structures ont été assurées par l'entreprise MACCAFERRI, en respectant la méthodologie développée dans la norme NFP 94-325-2 relative à la mise en œuvre des structures gabions en milieu hydraulique. Les principales étapes de réalisation consistent en la mise en place d'un géotextile non tissé anti contaminant sur le plan de pose, l'installation des cages vides à leur emplacement final et leur liaisonnement une à une par agrafage et enfin le remplissage, mécanisé dans un premier temps et finalisé par arrangement manuel par les ouvriers.

## Abstract

This paper focuses on the construction of flood protection works carried out in Sallèles d'Aude in 2017.

The works concern a levee protection 1680m long, four rainwater recovery structures, two retention basins, one pumping station, three road reinstatements and some annex works. The paper is mainly focused on the design and construction of the levee which has the particularity of being able to spill on all its length. It is composed of an anti-rodent mesh upstream, of an impervious core composed of low permeable materials, of a concrete threshold to assure the correspondence of the as-built spillway level and to form a cut-off wall and finally a sloped spillway in gabion mattresses Reno type to resist to hydraulic velocities and stresses. This technique constitutes a technical and economical solution able to resist to velocities up to 6m/s, rapid and ease of installation and with a reduced maintenance.

The paper presents the steps of the design and of the installation, discussing about the different technical choices regarding the type of work, selection of the material and highlighting the installation.



# Retour d'expérience sur les renforcements des levées de Loire en « deep soil mixing »

## *Deep soil mixing feedback in Loire levees*

S. Patouillard<sup>1</sup>, L. Saussaye<sup>2</sup>, E. Durand<sup>2</sup>, N. Manceau<sup>1</sup>,  
A. Le Kouby<sup>3</sup>, A. Coulet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> DREAL Centre-Val de Loire, Orléans,  
[Sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr](mailto:Sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr)

<sup>2</sup> Cerema, Blois, [LRB.DTerNC@cerema.fr](mailto:LRB.DTerNC@cerema.fr)

<sup>3</sup> Ifsttar, Champs-sur-Marne, [ggers.resp@ifsttar.fr](mailto:ggers.resp@ifsttar.fr)

### Résumé

Les levées de la Loire Moyenne assurent une protection contre l'inondation de la plaine alluviale en formant de grands systèmes d'endiguement totalisant près de 600 km d'ouvrages. Pour renforcer l'étanchéité d'une digue et de sa fondation, les techniques de mélange en place (deep soil mixing) sont désormais proposées. Elles consistent à désagréger le sol en place, le plus souvent à l'aide d'un outil de malaxage (lames spécifiques, tarières, tambours rotatifs...) et en introduisant un liant qui est mélangé avec le sol afin d'améliorer certaines caractéristiques. Ces techniques sont plus fondées sur un savoir faire des entreprises que sur des normes techniques et de nombreuses questions se posent concernant les contraintes de mise en œuvre, les moyens de contrôle et la pérennité des caractéristiques de ces écrans.

En 2013, la DREAL Centre-Val de Loire a dirigé des chantiers expérimentaux utilisant des techniques de mélange en place par tranchée de sol mixé (*deep soil mixing*). Ils ont montré la nécessité de disposer d'une étude approfondie des sols de la digue et de ses fondations, préalablement à la réalisation des travaux, pour adapter la technique et connaître les circulations naturelles de la nappe alluviale dans les couches perméables du sous-sol. Sur cette base, un protocole de suivi des écrans sur le long terme a été mis en place ainsi que des prescriptions de mise en œuvre et de contrôle. Le suivi sur plusieurs années semble aujourd'hui montrer une amélioration des performances dans le temps en ce qui concerne la perméabilité et confirme bien l'intérêt de la technique pour améliorer l'étanchéité de la digue et de sa fondation en garantissant la continuité de l'écran, mais d'autres essais sont encore nécessaires pour répondre à la pérennité à long terme.

Depuis lors, une vingtaine de kilomètres d'écrans ont été réalisés avec la technique de tranchée de sol mixé par voie sèche sur trois grands chantiers (Tour, Orléans et Veuves). Le retour d'expérience a conduit à faire évoluer les approches de conception et de réalisation en exploitant au mieux la connaissance des sols. Dans tous les cas, la mise en œuvre d'un test grandeur nature semble nécessaire pour

valider la technique au démarrage du chantier ainsi que des contrôles réguliers des caractéristiques de l'écran pendant sa construction (prélèvements pour Rc et forage pour essais de perméabilité *in situ*). Le coût moyen des opérations s'est élevé à moins d'un million d'euros le kilomètre comprenant l'écran étanche (7 à 8 mètres de profondeur en moyenne) ainsi que le traitement des canalisations rencontrées et la reprise des aménagements et structures de voirie. Le rendement de 160 m<sup>2</sup>/h a été atteint sur les sections courantes limitant notablement la durée des chantiers. La technique génère peu de vibrations et permet des travaux à proximité des habitations et des fondations de ponts. Sur certains secteurs, la présence de matière organique ont conduit à des défauts localisés de prise. Plusieurs formulations chaux/ciment ont été testées confirmant une marge d'adaptabilité de la technique sur des sols différents.

Ces éléments permettent d'ouvrir de nouvelles perspectives d'application de la technique pour restaurer l'étanchéité de digues anciennes en terre en fonction des types de sols rencontrés et des contraintes urbaines.

### **Abstract**

During the last national symposium "Digues 2013", DREAL Centre-Val de Loire presented different techniques used to reinforce Loire levees since the middle of the XX<sup>th</sup> century and especially "deep soil mixing" experiments beginning. These cut-off walls techniques had to be tested and evaluated to know if they could be used as a cheapest but still efficient solution.

After the first tests, DREAL Centre-Loire performed longer deep soil mixing cutoff-walls in Loire levees: Veuves (1 km long), Tours (10 km) and Orleans (7 km). These projects allowed the engineers to improve conception standards using soils and under-soil water circulation knowledge.

This article presents the state of the art based on deep soil mixing tests results (five years to check durability, engine performance, conception and building) and on larger levees works feedback which allowed to experiment different lime-cement formulations, water adding and mixing speed. These results could be applied to fix old ground levees depending on soil geology.

**Le recul stratégique des ouvrages  
de protection contre les inondations  
au service de la préservation et valorisation  
des milieux aquatiques  
Confortement de la digue sud d'Arles**

*The strategic retreat of flood protection  
structures to preserve and enhance aquatic  
environments*

*Reinforcement of the southern dike of Arles*

**M. Normand<sup>1</sup>, C. Delaunay<sup>2</sup>, T. Mallet<sup>3</sup>, P. Mercier<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> EGIS, Montpellier, [mathieu.normand@egis.fr](mailto:mathieu.normand@egis.fr)

<sup>2</sup> SCP, Aix-en-Provence, [christophe.delaunay@canal-de-provence.com](mailto:christophe.delaunay@canal-de-provence.com)

<sup>3</sup> SYMADREM, Arles, [thibaut.mallet@symadrem.fr](mailto:thibaut.mallet@symadrem.fr)

### **Résumé**

Dans le delta du Rhône, la protection contre les crues du fleuve est assurée par des digues anciennes, qui ont été édifiées et rehaussées au cours des derniers siècles. Ces dernières décennies, à la suite des épisodes de crue de 1993 et 1994, des études et travaux de confortement ont été entrepris par les gestionnaires d'ouvrage. Depuis la crue exceptionnelle de décembre 2003, un programme global de sécurisation de ces ouvrages est porté par le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM) dans le cadre du Plan Rhône.

Si les méthodes de confortement des digues ont connu des évolutions, liées aux progrès technologiques, aux recommandations techniques ou à la réglementation associée aux ouvrages, les projets de confortement connaissent également des transformations ces dernières années. En effet, après des phases de réparation de secteurs courts définis comme prioritaires, les réflexions sont menées sur des linéaires d'interventions plus importants, permettant une approche globale des ouvrages dans leur milieu et la prise en compte de l'environnement au sens large, depuis la conception jusqu'à la réalisation des ouvrages.

Le confortement de la digue du Grand Rhône rive gauche entre les mas de « Prendtê-Garde » et de « Grand Mollégès », réalisé sur environ de 7 km pour un montant total de 17,8 M€ HT, a permis de faire évoluer les méthodes de renforcement

traditionnellement appliquées sur ce territoire, depuis la conception du mouvement des terres à la réalisation effective des travaux. Le recul stratégique des ouvrages de protection a engendré des réflexions nouvelles, parfois contraignantes, mais conduisant à un chantier optimisé au regard de la prise en compte de l'environnement et de la préservation et valorisation des milieux aquatiques. C'est ainsi que plus de 12 Ha d'espace de mobilité du fleuve ont pu être restaurés dans le cadre des travaux, dont 4 Ha en zones humides.

Après avoir exposé les principaux enjeux et contraintes du projet, l'article présente la technique de confortement appliquée ces dernières années sur des ouvrages similaires (confortement en place avec déblais-remblais partiels, abattage de ripisylve et protections de berge en techniques lourdes) et la technique de confortement effectivement réalisée (recul d'ouvrage avec déblais-remblais intégral de la digue, réemploi optimisé des matériaux au sein d'une digue zonée et préservation des milieux existants).

Les différentes thématiques et les problématiques rencontrées sont décrites (acquisitions foncières importantes, nécessité de déplacement de réseaux d'irrigation existants, gestion du risque de crue pendant les travaux, optimisation et valorisation des matériaux du chantier, nécessité de caractérisation préalable des matériaux et suivi du compactage des remblais, protection des milieux naturels environnants...). Un bilan économique, une synthèse des avantages/inconvénients et un retour d'expérience sur les difficultés rencontrées permettront d'améliorer ces nouvelles stratégies de protection contre les inondations.

### **Abstract**

In the Rhône Delta, the dikes protecting the population from floods are old ones. After major floods occurred, works' managers have carried out reinforcement studies and works. The SYMADREM (Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer) initiated a global security program, within the scope of the Plan Rhône.

Dikes reinforcement methods have experienced progresses and the projects have changed due to nowadays' significant scales of intervention, allowing a global approach of works in their environment as well as a global environmental awareness.

The reinforcement of the Grand Rhône dike on the left bank south of Arles, built over about 7 km, permitted to develop traditional reinforcement methods used on this territory. The protection works' moving back has triggered reflections leading to an optimised construction site regarding the natural environment consideration as a whole.

The different discussed themes and encountered problems, including during the works' phases, allow having an operational feedback to improve these new protections against floods strategies.

# Retour d'expériences sur des travaux de réalisation d'ouvrages traversants sous digue

## *Feedback from experiences on works through levees*

M. Fernandes<sup>1</sup>, M. Gilbert<sup>2</sup>, J. Vanwarreghem<sup>3</sup>, E. Vuillermet<sup>3</sup>

<sup>1</sup> BRL Ingénierie, Nîmes, [miguel.fernandes@brl.fr](mailto:miguel.fernandes@brl.fr)

<sup>2</sup> BRL Ingénierie, Nîmes, [matthieu.gilbert@brl.fr](mailto:matthieu.gilbert@brl.fr)

<sup>3</sup> BRL Ingénierie, Nîmes, [julien.vanwarreghem@brl.fr](mailto:julien.vanwarreghem@brl.fr)

<sup>4</sup> BRL Ingénierie, Nîmes, [eric.vuillermet@brl.fr](mailto:eric.vuillermet@brl.fr)

### Résumé

Lors des travaux de création ou réhabilitation de digue de protection contre les inondations, nous sommes confrontés à la nécessité de créer des ouvrages traversants fiables, ou de devoir gérer la présence de réseaux sans que ceux-ci ne constitue un point faible de la digue. En effet, les réseaux techniques présents sur une digue (canalisations d'eau ou de gaz, câbles électriques...) ainsi que les ouvrages de gestion hydraulique peuvent, s'ils sont défectueux, impacter fortement le niveau de sûreté de la digue.

Cet article a pour objectif de partager notre retour d'expérience de réalisation de ces ouvrages traversants réalisés lors des travaux sur des digues de protection. Le panel d'ouvrages intègre la traversée de réseaux secs, de réseaux humides qu'ils soient en pression ou gravitaires, ainsi que la création d'ouvrage de gestion hydrauliques du réseau pluvial de la zone protégée qu'ils soient gravitaires ou en station de relevage.

Pour ces différents ouvrages, nous abordons :

- les techniques employés : fonçage, passage en siphon, terrassement...),
- les dispositions constructives retenues (écrans anti-renard, fruits de bajoyer extérieur, drainage, étanchéité des regards et fourreaux, gestion des tassements), associées aux modalités d'exécution des ouvrages génie-civil
- les conditions de réalisation du remblaiement : compactage soigné avec des moyens adaptés, béton coulé en place,
- les modalités de réalisation avec joint au droit des reprises...)

mais aussi les éléments de contrôle mis en place en identifiant quelques points critiques spécifiques :

- contrôles topographiques,
- qualité des remblais attenants et de leur mise en œuvre,

- la prise en compte des tassements
- Le contrôle de l'étanchéité du dispositif ou de l'ouvrage de gestion pluviales portant autant sur le génie civil que la vantellerie (clapet et vanne).



OUVRAGES DE GESTION HYDRAULIQUE TRAVERSANT ET DE POMPAGE AVANT ELEVATION DE LA DIGUE (©BRLi)

Nous attirons aussi l'attention sur la nécessité d'intégrer le suivi de ces ouvrages dans la surveillance et l'entretien des ouvrages de protection contre les inondations nécessitant de conventionner avec les gestionnaires de réseaux, et d'avoir à disposition des dossiers de récolement fiables, des dossiers d'intervention ultérieure sur l'ouvrage (DIUO) ainsi que des notices d'entretien du matériel hydromécaniques.

### **Abstract**

When creating or rehabilitating flood protection dams, we are confronted with the need to create reliable through structures.

Indeed, the technical networks present on a dike (water or gas pipes, electrical cables, hydraulic structures...) can, if they are faulty, strongly disturb the level of safety of the dike.

The purpose of this article is to share feedback on the construction of these through structures carried out during work on protection dikes

The panel of works integrates the crossing of dry networks, wet networks as well as the creation of works of hydraulic management of the rainwater network of the protected zone or restoration of hydraulic continuity of irrigation canals.

Through the work of creating second row dykes in the Plaine de l'Aude, reinforcing the first row dyke of the Vidourle and the Durance, we will approach the techniques used (sinking, excavation/filling...), the construction provisions retained (screens, drainage, watertightness of manholes and sheaths), the constraints of construction (careful compaction, poured concrete in place with joint at the right of the resumptions,) as well as the control elements put in place: geotechnical controls, load tests for rainwater management works, covering both civil engineering and valve and gate construction.

# **Gestion des matériaux sur le projet « Isère amont » Retour d'expérience de la tranche 1 achevée et des tranches 2 et 3 en cours**

## ***Management of excavated materials of the “Isère Amont” project – Return of experience on the completed Tranche 1 and on going Tranche 2 and 3 of the works***

**J.-F. Frézet<sup>1</sup>, O. Manin<sup>2</sup>,  
L. Boutonnier<sup>1</sup>, J.-P. Pinchart<sup>1</sup>, A. Le Peillet<sup>1</sup>, F. Dermenonville<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Egis, Seyssins, [jean-francois.frezet@egis.fr](mailto:jean-francois.frezet@egis.fr)

<sup>2</sup> Symbhi, Grenoble, [olivier.manin@isere.fr](mailto:olivier.manin@isere.fr)

### **Résumé**

Le projet « Isère amont » est basé sur le principe de champs d'inondation contrôlés (CIC) sur plus de 50 km à l'amont de Grenoble. À partir de la crue trentennale, les zones agricoles sont inondées et le stockage de l'eau dans ces zones, jusqu'à 25 millions de mètres cubes, permet de protéger les zones habitées jusqu'à la crue bicentennale dont le débit de pointe est alors réduit de 18 %.

Les travaux ont démarré en 2012 pour un budget prévisionnel de 135 millions d'euros. La première tranche de travaux est terminée. Les tranches 2 et 3 seront opérationnelles fin 2020.

Du point de vue des terrassements, les travaux comprennent :

- des arasements de bancs dans le lit de l'Isère pour obtenir un gabarit hydraulique suffisant jusqu'à la crue trentennale,
- des plages de dépôt, pièges à sédiments, en fond de lit mineur en aval du dispositif,
- des élargissements et renforcements des digues existantes le long de l'Isère,
- des reculs de digues et la création de nouvelles digues pour stocker davantage d'eau dans les CIC,
- des remblaiements partiels de gravières existantes pour créer des zones humides.

Les ressources en matériaux (limons, sablons, graves) susceptibles d'être largement polluées par des espèces végétales invasives, ont été évaluées à environ un million de mètres cubes. Ces ressources ont été valorisées au maximum pour des raisons à la fois économiques et environnementales.

Le retour d'expérience de la gestion des matériaux et de leur réutilisation, à mi-parcours des travaux des tranches 2 et 3 est le suivant :

- la stratégie de réemploi définie initialement doit permettre l'adaptation à une ressource qui peut varier au gré des crues, et dont la connaissance n'est pas si facile à acquérir.
- le mouvement de terres doit également intégrer une stratégie spécifique pour les espèces végétales invasives (zone de dépôts spécifiques, traitement adapté des matériaux).
- les équipes de maîtrise d'œuvres et les entreprises doivent être en mesure de proposer des adaptations des coupes-types des ouvrages au fur et à mesure de l'avancement du chantier pour prendre en compte les ressources effectivement disponibles. On pourra tirer parti d'un allotissement adapté.
- le mouvement global des matériaux doit intégrer les différentes contraintes temporelles d'intervention (régime hydrologique, contraintes liées à l'avifaune.). Le curage des bancs n'est pas nécessairement simultané avec les travaux de construction des merlons et de réfection des digues.

### **Abstract**

The « Isère Amont » project is based on the implementation of « expanding flood areas » (called “champ d'inondation contrôlée” –CIC-) all along the 50 km long Isère valley and aims to protect the urbanized areas from a bicentennial flood, upstream from Grenoble. From the 30 years return period flood, inhabited cultivated areas begin to be flooded. Water stored in the flood plain allows to protect urbanized areas till the bicentennial flood.

The building phase was launched in 2012 and is worth 135 million euros. A first construction phase costing 52 millions euros has been achieved. Final two phases will be achieved in 2020. The works consisted in:

- removing bank in the river channel to improve water carrying capacity ;
- creating two deposits area in the river channel ;
- enhancing existing embankment along the Isère river ;
- settling new embankments in the flood plain to store water in the CIC ;
- restoring sand and gravel quarries in humid areas.

The volume of excavated material is estimated at 1 millions cubic meters consisting in silt, silty-sand and gravelly sands that can be polluted by invasive plants.

At this point of the works the return of experience is the following:

- initial earth movement strategy should be able to cope with changes in the availability of materials, mainly due to flood ;
- earth movement shall take in account invasive plants pollution and define a dedicated mitigation strategy ;
- engineering and contractors teams should be aware that reference cross section of structure will change to cope with changing material availability ;
- earth movement should take in account various time constraints, based on hydrological of environmental matters, on each part of the project. Dredged material cannot necessarily be used directly on embankment works.



# **Travaux de sécurisation de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques : retour d'expérience sur le suivi géotechnique d'exécution, sa supervision et son contrôle**

## *Works to secure the Rhône levee between Beaucaire and Fourques: feedback on the geotechnical monitoring of execution, its supervision and control*

**D. Chaussée<sup>1</sup>, C. Delaunay<sup>2</sup>, V. Perset<sup>3</sup>, T. Mallet<sup>4</sup>, P. Mercier<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> SUEZ Consulting, Aix en Provence, [denis.chaussee@suez.com](mailto:denis.chaussee@suez.com)

<sup>2</sup> SCP, Aix en Provence, [christophe.delaunay@canal-de-provence.com](mailto:christophe.delaunay@canal-de-provence.com)

<sup>3</sup> CEBTP, Montpellier, [v.perset@groupe-cebtp.com](mailto:v.perset@groupe-cebtp.com)

<sup>4</sup> SYMADREM, Arles, [thibaut.mallet@symadrem.fr](mailto:thibaut.mallet@symadrem.fr)

<sup>4</sup> SYMADREM, Arles, [pascal.mercier@symadrem.fr](mailto:pascal.mercier@symadrem.fr)

### **Résumé**

Les travaux de sécurisation de la digue du Rhône entre Beaucaire et Fourques s'inscrivent dans le cadre du Plan Rhône. Ils ont débuté en septembre 2016 et ont été achevés fin 2018. Ils consistent en la réalisation d'une digue résistante à la surverse de 5 km, calée à la crue centennale et d'une digue de 8 km dite « millénale », calée 50 cm au-dessus de la crue millénale. L'article traite du tronçon millénal (non protégé à la surverse) d'un linéaire de 8 km et dont les travaux se sont achevés en avril 2018. Le mode de construction retenu consiste à démonter par plot glissant la digue existante en limons puis remettre en œuvre ces matériaux triés en contrôlant strictement leur teneur en eau et leur densité. Le volume manquant est complété avec des limons d'apport issus de zones d'emprunt préalablement identifiées et caractérisées.

La bonne connaissance et le zonage préalable du gisement, le contrôle de la teneur en eau et de la densification du matériau lors de sa mise en œuvre constituent les étapes clé de cette phase de travaux.

L'article décrit l'organisation du suivi géotechnique imposé aux entreprises (mission G3), de sa supervision et son contrôle assurée par le maître d'œuvre (SUEZ Consulting, anciennement SAFEGE), la mission G4 (GINGER CEBTP/ Société du Canal de Provence) et avec l'appui du contrôle extérieur (GINGER CEBTP/ Société du Canal de Provence).

Le plan de contrôle prévisionnel a été défini par le maître d'œuvre et la mission G4. Il permet au regard :

- des volumes à mettre en œuvre (540 000 m<sup>3</sup> de limons sur 8 km)
- et des cadences envisagées (5000 à 7 000 m<sup>3</sup> par jour),

de disposer d'une bonne vision de la compacité et de la teneur en eau à la mise en œuvre du matériau, avec 1 couple de valeur pour 600 à 700 m<sup>2</sup> de couche de corps de digue. Ces essais au gamma densimètre (pour la densité) et à l'étuve (pour la teneur en eau) sont complétés par des pénétromètres dynamiques légers toutes les 3 couches, des identifications ainsi que des essais PROCTOR chaque jour pour chaque atelier.

L'article propose une analyse des tendances dans la distribution des paramètres : teneur en eau et densité. Les distributions des fréquences ont été calculées pour chaque paramètre pour les valeurs optimum (issues des essais PROCTOR) et pour les valeurs mesurées lors de la mise en œuvre.

Ces distributions montrent que la volonté d'une mise en œuvre à l'état "m" ou début de l'état "h" se traduit, au-delà de 20 % de teneur en eau, par une fréquence supérieure des valeurs effectivement mesurées par rapport à Wopn. Le corolaire d'une teneur en eau volontairement supérieure à Wopn se traduit par une distribution globale des densités mesurées inférieure à la distribution des densités OPN.

L'article conclue sur l'organisation de la supervision géotechnique et montre que l'intervention d'un contrôle extérieur adossé à la mission G4 a permis au maître d'œuvre de renforcer sensiblement sa supervision des opérations délicates du chantier.

Le caractère systématique et adapté aux cadences du chantier des interventions du contrôle extérieur permet au maître d'œuvre de disposer d'un levier fort pour garantir un respect constructif du plan de contrôle et des objectifs de qualité. En effet la réactivité et la bonne communication entre tous les acteurs ont fait que les intérêts de tous ont convergé vers la mise en place des moyens adaptés pour que les anomalies soient les moins fréquentes possibles et qu'en cas d'apparition elles soient le plus rapidement traitées.

## **Abstract**

The work of securing the Rhone levee between Beaucaire and Fourques began in September 2016 and will be completed by the end of 2018. The method of construction used consists of dismantling the existing levee and then reworking these sorted materials while controlling strictly their water content and density. The missing volume is completed with supply silts from previously identified and characterized borrow pits. In April 2018, work on rebuilding the levee body with compacted silt was completed on the section unprotected at the overflow. The article focuses on this section of 8 km, the volume of the impermeable core represents 540 000 m<sup>3</sup> implemented over 5 months.

The knowledge and prior zoning of the deposit, the control of the water content and the densification of the material during its implementation are the key stages of this phase of work.

After a reminder of the components of the structure, associated functions and compliance criteria, the article describes the organization of geotechnical monitoring imposed on companies (G3 mission according NF P94-500 standard), its supervision and control by the project manager and external control / G4 mission. The article presents, from the point of view of the main contractor and the external control / G4, the stakes of the supervision and the control of the geotechnical follow-up to guarantee the respect of the conformity criteria while maintaining high rates of implementation necessary to the respect of the schedule of operation.

# Chantier du remblai ferroviaire Arles-Tarascon : gestion de la sécurité en crue

## *Arles-Tarascon railway embankment modifications: flood risk management*

M. Sutter<sup>1</sup>, R. Tourment<sup>1</sup>,  
P. Pelt<sup>2</sup>, B. Beullac<sup>1</sup>, J.M. Bernard<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IRSTEA, Aix-en-Provence, [mathieu.sutter@irstea.fr](mailto:mathieu.sutter@irstea.fr)

<sup>2</sup> SYSTRA, Marseille, [ppelt@systra.com](mailto:ppelt@systra.com)

<sup>3</sup> SNCF RESEAU I&P, Marseille, [jean-michel.bernard@sncf.fr](mailto:jean-michel.bernard@sncf.fr)

### Résumé

Les 3 et 4 décembre 2003, une importante crue du Rhône a touché plus de 12 000 personnes et occasionné plus de 700 millions d'euros de dommages. Cette crue et plusieurs autres ayant touché la France au cours de la décennie, ont amené les pouvoirs publics à prendre conscience de la nécessité d'une stratégie globale de prévention des inondations. Sur le Rhône, cette stratégie se concrétise par le « Plan Rhône », regroupant plusieurs opérations interdépendantes.

Parmi ces opérations pour lesquelles le SYMADREM vise la rénovation complète du système de digues de protection du Rhône, une des principales, est la création d'une digue de 1<sup>er</sup> rang, en rive gauche du Rhône entre Arles et Tarascon. La digue étant conçue pour être déversante sur une partie de son linéaire, elle nécessite la mise en transparence hydraulique et le confortement du remblai ferroviaire SNCF qui assure actuellement la fonction de protection contre les inondations. La mise en transparence du remblai ferroviaire est dimensionnée de façon à évacuer le débit de déversement de la crue exceptionnelle du Rhône de période de retour 1 000 ans.

Les travaux inclus dans l'opération sont réalisés de façon concomitante entre 2017 et 2020 mais le système de protection ne sera fonctionnel qu'une fois l'ensemble des travaux réalisés. D'ici-là, la SNCF RESEAU a pour obligation de maintenir la continuité de protection des populations dans la plaine du Trébon.

Afin de respecter cette obligation, SNCF RESEAU a mis en place un ensemble d'actions permettant d'assurer la sécurité du chantier, composé de différentes phases aux enjeux bien définis, ainsi que du remblai ferroviaire en cas de crue.

Ces actions, présentées dans la communication, répondent à des incertitudes techniques et organisationnelles conséquences du contexte global du projet. Elles

sont également développées dans la communication. Les actions retenues se regroupent autour de 4 thèmes majeurs :

- La connaissance et la surveillance de l'aléa crue ;
- Une organisation à tenir lors des différentes phases des travaux (en cas de crue prévue ou en cours), au travers de consignes spécifiques ;
- La formation des personnels intervenants lors des travaux, à la surveillance des ouvrages et aux particularités de ceux-ci ;
- La mobilisation d'experts en ouvrages hydrauliques pour assister la maîtrise d'ouvrage sur demande.

## **Abstract**

On December the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> of 2003, a huge flood occurred on the Rhone river, one of the greatest in France. As a consequence, more than 12 000 people and an important part of the economic activities of the area were impacted. Other inundations have occurred since the 1990s and a global public policy for flood management was introduced in 2009 through the "Plan Rhone".

This flood management system is made with interrelated operations. This article deals with a part of the main one that consists on the creation of new overtoppable levee (by the SYMADREM) as a replacement of the actual one which is mainly a railway embankment owned by the SNCF. This new levee section is situated between the cities of Tarascon and bank Arles on the East of the Rhone river and aims to protect the two cities from flooding with a probability of occurrence up to 10<sup>-3</sup>. In order to obtain a consistent system of defence against floods, this embankment has to leave the water flowing over the future SYMADREM levee to pass through, that brought SNCF to design ten new flood discharge structures under the railway.

Both parts of this operation will be done almost in the same time (between 2017 and 2020). French control authorities asked SNCF RESEAU to keep the same level of flood defence until the new levee is operational. In order to respect this policy, SNCF RESEAU proposed some actions that will help to provide work and levee safety all along the operation.

This communication deals with these actions, which respond to technical and organizational uncertainties resulting from the overall context of the project. Four main themes rallied these actions:

- Knowledge and monitoring about flooding hazard;
- An organization to be held during the different phases of the works (in the event of a planned or ongoing flood), through specific instructions;
- The training of the personnel involved in the work, the supervision of the works and their particularities;
- The mobilization on request of experts in hydraulic works to assist the project owner.

# **La réhabilitation de la digue Carnot à Boulogne-Sur-Mer : Les particularités des travaux de confortement d'une digue en mer**

## ***The rehabilitation of the Carnot dike in Boulogne-Sur-Mer: The particularities of the reinforcement works of a dike at sea***

**A. Raillard<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> BRL Ingénierie, Nîmes, [alexis.raillard@brl.fr](mailto:alexis.raillard@brl.fr)

### **Résumé**

La digue Carnot est un ouvrage de trois kilomètres de longueur, qui protège la rade de Boulogne-sur-Mer des houles dominantes.

Cet ouvrage est primordial à la sauvegarde des quais et terre-pleins du port et de secteurs d'habitations de la ville, pour limiter l'agitation portuaire, mais également vis-à-vis des problématiques de submersions marines et de franchissement.

La digue Carnot est un ouvrage de type «digue mixte», réalisé en plusieurs phases étalées sur une période de 80 ans, et qui est fortement exposée aux sollicitations de la mer.

Dans le cadre des études de diagnostic, les désordres suivants ont été mis en évidence :

- un défaut généralisé de butée de pied de la carapace, favorisant les descentes de blocs en partie courante et fragilisant les couches filtres et la risberme extérieure,
- Une fissuration de la maçonnerie de la muraille, caractéristique de tassements différentiels,
- Des zones de décompactations du remplissage de la muraille,
- Des désordres classiques des parties d'ouvrages en béton armé et en maçonnerie,
- Des dégradations, voire l'arrachement de tronçons de murs chasse mer sous l'assaut des vagues.

Les études d'avant-projet ont ensuite été menées suivant trois configurations, pour des montants de travaux estimés entre 10 et 100 M€ HT environ :

- Travaux de Gros Entretien : remise en état de l'ouvrage conformément à son état initial, consistant en des travaux classiquement réalisés jusqu'à présent ; réparations des parties maçonnées et bétonnées et rechargements localisés de la carapace.

- Travaux Court Terme : confortement de la digue pour répondre au critère de durée de vie de 50 ans, consistant en des travaux de Gros Entretien et la réalisation d'une butée de pied pour stabiliser la descente des blocs.
- Travaux Long Terme : travaux complémentaires à engager pour porter la durée de vie de l'ouvrage à 100 ans, comprenant les travaux Court Terme, la rehausse des murs chasse mer et le rechargement complet de la carapace.

Les travaux de Gros Entretien ont débuté en 2017 pour une durée de deux ans.

Les contraintes, propres aux travaux en mer, ont été prises en compte pour la réalisation des travaux. Il s'agit en particulier de :

- La mise en œuvre de moyens nautiques lourds, pour permettre le stockage des blocs qui seront posés à la journée et leur mise en place.
- La prise en compte de la marée :
  - Les blocs de carapace en partie courante étant posés à marée haute pour disposer d'un tirant d'eau suffisant pour la navigation du ponton automateur à proximité de la digue ;
  - Les blocs de carapace de l'enracinement étant mis en œuvre à marée basse par engins terrestres, la profondeur d'eau étant insuffisante dans cette zone par rapport au tirant d'eau des moyens nautiques ;
  - Le confortement des risbermes au moyen de géoblocs ne pouvant être réalisé qu'à marée basse ;
  - Les travaux sur la muraille en maçonnerie étant réalisés à marée basse également, au moyen de cordistes.
- Les conditions météorologiques, en particulier le vent pour les travaux de levage avec grue et la houle pour l'utilisation des moyens nautiques.

### **Abstract**

The Carnot breakwater is a three-kilometre-long structure that protects the Boulogne-sur-Mer harbour from the dominant swells.

This structure is essential to the safeguarding of the quays and harbour infrastructures and of residential areas of the city, to limit port agitation, but also with regard to the problems of marine submersions and overtopping.

The Carnot breakwater is a mixed structure, built in several phases over a period of 80 years, and which is highly exposed to the loads of the sea.

The design studies were then carried out according to three configurations, for work amounts estimated between approximately 10 and 100 M€ HT:

- Maintenance work : restoration of the structure to its original state ;
- Short-term works : reinforcement of the dike to meet the 50-year lifespan criterion ;
- Long term works: additional works to be undertaken mto extend the life of the structure to 100 years,

Heavy Maintenance work began in 2017 for a two-year period.

This work required the use of substantial nautical means and the taking into account of the tides, in particular for the reloading of the primary cover layer with artificial blocks of 50 tons, the realization of geoblocks on the risberms and the reinforcement of the masonry wall.

# **Réhabilitation de la protection contre les inondations de Tarascon Un panel d'ouvrages variés : la digue de la Montagnette, le château Royal de Provence aux pieds dans le fleuve et un ancien quai**

## ***Rehabilitation of flood protection in Tarascon. A variety of works: the Montagnette dike, the Royal Castle of Provence at the foot of the river and an old quay***

**M. Gilbert<sup>1</sup>, E. Vuillermet<sup>1</sup>, T. Mallet<sup>2</sup>, P. Mercier<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> BRL Ingénierie, Nîmes, [matthieu.gilbert@brl.fr](mailto:matthieu.gilbert@brl.fr),

<sup>2</sup> SYMADREM, Arles, [thibaut.mallet@symadrem.fr](mailto:thibaut.mallet@symadrem.fr)

### **Résumé**

La digue de la Montagnette assure la protection contre les crues du Rhône au Nord de Tarascon, depuis le centre-ville où elle est sous forme d'anciens quais jusqu'au massif de la Montagnette 6 km au Nord où elle est constituée de remblais. Ce dispositif intègre une singularité : le château Royal de Provence. Après le diagnostic des ouvrages, il a été nécessaire de concevoir et réaliser la réhabilitation des ouvrages en intégrant une évolution des sollicitations hydrauliques.

Les quais, d'un linéaire de 700 m, sont constitués par deux parements verticaux en pierres de taille insérant un remblai hétérogène. La promenade en crête est carrossable sur la majeure partie du linéaire. Elle est encadrée de parapets en pierre et son revêtement bitumineux fissuré n'isole plus le corps de quai des infiltrations pluviales.

Le renforcement des quais de Tarascon s'opéré en 2014 par un rejointoiement des pierres de taille des parements constituant l'ouvrage ainsi que des murs sommitaux. Sur le parement coté ville, des tubes éjecteurs ont été forés afin de gérer le risque lié aux écoulements internes en cas de crue exceptionnelle.

Le Château Royal de Tarascon, monument historique XIe-XIIIe siècles, impose une façade exposée au Rhône de 250 m. Il s'est avéré le principal point d'entrée d'eau dans la ville lors de la crue de 2003. Sa façade fera l'objet en 2018 d'un rejointoiement par voie acrobatique. Des ouvertures, en particulier la grande porte de la Poterne donnant sur le Rhône, seront sécurisées. Une réhabilitation de la

fonction « protection contre les inondations » nécessitant une approche singulière entre Maître d'ouvrage, bureau d'études et architecte agréé et les services dédiés aux ouvrages patrimoniaux.

La digue de la Montagnette représente un linéaire de 4 600 m entre le Château et les premiers reliefs. Digue en remblai, son parement amont incliné est protégé par un masque béton dégradé et fissuré qui nécessitait une réfection. Un muret sommital en pierres maçonnées disjointes assurait un niveau de sûreté insuffisant.

Les travaux de confortement du parement amont ont consisté en la réalisation en 2015 d'un nouveau masque de protection par béton projeté ancré sur le support d'origine. La surface traitée représente 30 000 m<sup>2</sup> sur 4 km et a nécessité la réalisation de 160 000 forations sur parement incliné pour connecter les aciers. L'opération a été réalisée par une innovation technique de l'entreprise : une rampe perforatrice modulable. Le muret sommital a été rejointoyé et rehaussé par une pierre de couronnement.

Le parement côté protégé sera réaménagé en 2018 avec la mise en œuvre d'un filtre et d'un masque drainant constitué de petits enrochements. Ce dernier composant a été adapté suite aux conclusions de l'étude de dangers du système d'endiguement pour permettre d'offrir en sus de la fonction de drainage une résistance à la surverse pour une crue extrême (danger) dépassant la crue de projet (sûreté).

## **Abstract**

The Montagnette dike provides flood protection against the Rhône River north of Tarascon, from the city centre where it is in the form of old quays to the Montagnette massif 6 km to the north where it is made up of embankments. This system incorporates a singularity: the Royal Castle of Provence.

The 700 m long quays are made up of two vertical dressed stone facings that insert a heterogeneous backfill with a cracked bituminous pavement that no longer isolates the quay body from rainwater infiltration.

The reinforcement of the Tarascon quays was carried out in 2014 through work to repoint and repair the cut stones of the facings that make up the structure and the top walls. On the city side facing, ejector tubes were drilled to manage the risk associated with internal flows in the event of an exceptional flood.

The Royal Castle of Tarascon was the main point of entry of water into the city during the 2003 flood. In 2018, its facade will be repointed by acrobatic means. Opening onto the Rhône will be secured.

The Montagnette dike represents a 4 600 m line between the Château and the first foot Hills.

Its inclined upstream facing was protected by a degraded and cracked concrete mask. The reinforcement work consisted in the construction in 2015 of a new mask made of sprayed concrete anchored on the original support. The treated area represents 30,000 m<sup>2</sup> over 4 km.

The protected side facing will be redesigned in 2018 with the use of a filter (geotextile) and a draining mask made of small rockfill.



# Travaux de confortement des quais du Rhône en traversée d'Arles

## *Reinforcement of Arles's embankments and docks*

MH. Prost<sup>1</sup>, A. Salmi<sup>1</sup>, M. Normand<sup>2</sup>,  
T. Mallet<sup>3</sup>, P. Mercier<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ISL Ingénierie, Montpellier, [prost@isl.fr](mailto:prost@isl.fr)

<sup>2</sup> Egis eau, Montpellier, [mathieu.normand@egis.fr](mailto:mathieu.normand@egis.fr)

<sup>3</sup> SYMADREM, Arles, [thibaut.mallet@symadrem.fr](mailto:thibaut.mallet@symadrem.fr)

### Résumé

Les quais du Rhône dans la traversée d'Arles sont des ouvrages qui ont été édifiés dans leur configuration actuelle à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ils appartiennent pour partie à Voies Navigables de France, au SYMADREM et à la ville d'Arles.

Les quais dans la traversée d'Arles assurent la protection contre les inondations par le Grand Rhône de la ville d'Arles et permettent l'amarrage de bateaux hôtel de tourisme ainsi que de petites unités fluviales. Ils font partie d'un vaste système d'endiguement qui protège environ 55 000 personnes en rive gauche et 15 000 en rive droite (classe A et B respectivement).

Les quais sont constitués de murs verticaux ou de perrés inclinés (pente de 1H/1V) avec ou sans chemin de halage dont la cote de crête est voisine de 9 m NGF. Le pied de l'ouvrage est situé au niveau d'étiage du Rhône à environ 0,5 m NGF.

Outre des défauts liés aux mécanismes classiques de vieillissement des maçonneries, le diagnostic des quais a mis en évidence un sous-cavage généralisé des structures en maçonnerie consécutif à un abaissement du niveau d'étiage induit par un surcreusement du lit après endiguement (la fosse d'Arles atteint -17 m/NGF).

Cette évolution a généré de nombreux désordres sur les structures (dislocation des perrés en pied, perte de la capacité portante en fondation des murs poids). Ces observations ont conduit le SYMADREM à engager un programme de travaux pluriannuel de confortement des quais d'Arles, qui a débuté en 2004 et s'est achevé en 2016.

Les objectifs poursuivis dans le cadre des travaux étaient à la fois structurels, architecturaux et patrimoniaux en intégrant également les usages.

Les travaux ont été réalisés entre 2004 et 2016 pour un montant total de l'ordre de 25 M€. Ils se sont avérés particulièrement complexes du fait :

- De la multiplicité des technologies mises en œuvre : pieux, béton armé, tirants, maçonneries, remblai, palplanches, structures métalliques, injections, hydromécaniques (parfois sur un même quai)...

- De l'environnement urbain ayant nécessité la réalisation de la plus grande part des travaux par voie fluviale,
- De la forte exposition des travaux aux crues du Rhône y compris les crues courantes,
- De la profondeur du Rhône dans le périmètre des travaux (jusqu'à -17 m NGF),
- De la sensibilité du bâti avoisinant parfois très ancien,
- Des ouvrages traversants à intégrer aux travaux,
- De la forte fréquentation du site,

La communication a pour objet de présenter les pathologies rencontrées, le diagnostic réalisé et les solutions techniques mises en œuvre pour pallier les possibles défaillances. Les contraintes de chantier notamment vis-à-vis du risque de crues sont abordées, ainsi que la gestion des batardeaux.

### **Abstract**

Rhone's docks in Arles city have been built at the end of the nineteenth century. Their roles are to provide protection against floods and to allow tourism shipping units to moor safely.

Docks are part of a wide dike system protecting about 52 000 people on the left bank and about 7000 on the right (dykes are respectively ranked A and B according French laws).

They are made of vertical masonry walls or steep (1H/1V) facing stone banks with or without an intermediate path. Their heights are approximately 8 meters. Foundations are at Rhone's low-water level which is only 0.5 m above sea level in Arles.

Docks present usual damages observed on masonry and a general undermine of the structures. This last phenomenon has been caused by the lowering of low-water level due to dykes' construction and hydroelectric developments. This trend has generated many structural disorders.

In 2004, the SYMADREM decided to set up a major 10 years program in order to strength and reinforce the overall Arles' dyking structures.

The main aims were to:

- Improve structural docks' resistance
- Respect the city's architectural design
- Protect and value onsite existing roman heritage
- Include touristic purposes

Works have taken place between 2004 and 2016. The total cost for the renovation was close to 25 M€.

Works were particularly complicated, due to numerous technical, environmental or climatic constraints.

# Digues résistantes en sol traité à la chaux : les apports du projet DigueELITE et les conséquences sur la conception

## *DigueELITE project: lessons learned from the project and impact on the design of dikes with lime treated soils*

N. Nerinx<sup>1</sup>, S. Bonelli<sup>2</sup>, G. Herrier<sup>3</sup>,  
P. Tachker<sup>4</sup>, D. Puiatti<sup>5</sup>, F. Cornacchioli<sup>6</sup>,  
S. Nicaise<sup>2</sup>, D. Lesueur<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ISL, Lille, [nerinx@isl.fr](mailto:nerinx@isl.fr)

<sup>2</sup> Irstea, Aix-en-Provence, [stephane.bonelli@irstea.fr](mailto:stephane.bonelli@irstea.fr)

<sup>3</sup> Lhoist R&D, Nivelles (Belgique), [gontran.herrier@lhoist.com](mailto:gontran.herrier@lhoist.com)

<sup>4</sup> EDF-CIH, Le Bourget du Lac, [pierre.tachker@edf.fr](mailto:pierre.tachker@edf.fr)

<sup>5</sup> DPST Consulting, Villemomble, [daniel.puiatti@dpst-consulting.com](mailto:daniel.puiatti@dpst-consulting.com)

<sup>6</sup> Arcor Technologies, Meyreuil, [fcornacchioli@arcortechnologies.com](mailto:fcornacchioli@arcortechnologies.com)

### Résumé

Le traitement des sols à la chaux est couramment utilisé pour l'amélioration et la stabilisation des sols limoneux et argileux, dans le cadre de la construction d'infrastructures. L'intérêt de cette technique dans le cadre des ouvrages hydrauliques en terre est croissant. En effet, il a été montré lors de programmes de recherche que le matériau sol-chaux pouvait efficacement remplir une série de fonctions pertinentes pour les ouvrages hydrauliques : stabilité, faible niveau de perméabilité, résistance à l'érosion interne et de surface. Des expérimentations à l'échelle du laboratoire et sur des réalisations en vraie grandeur, ainsi que des retours d'expérience à travers le monde, ont appuyé ces constats.

Récemment, dans le cadre du projet de R&D DigueELITE, la résistance à la surverse d'une digue en sol traité à la chaux le long de la rivière Vidourle (Gard, France) a pu être quantifiée, à l'aide d'un dispositif d'essai de surverse *in situ* innovant, issu du projet. Les résultats montrent une résistance à l'érosion par surverse du sol-chaux 5 à 10 fois plus élevée que le même sol non traité, le contraste le plus important étant mesuré aux points sensibles de la digue (crête et pied de talus).



FIGURE 1 : VUE AERIENNE DE L'OUVRAGE DEMONSTRATEUR APRES REALISATION (GAUCHE) // ESSAIS DE SURVERSE *IN SITU* (DROITE)

Après un bref rappel des propriétés conférées au sol par le traitement à la chaux, l'article présente :

- Les résultats des essais de surverse sur l'ouvrage démonstrateur du Vidourle et leur interprétation
- Les impacts des résultats du projet DigueELITE sur la conception des digues et des petits barrages en remblai
- Une analyse économique
- Le bilan du projet DigueELITE et les perspectives à court et moyen terme.

### **Abstract**

Nowadays, lime-treatment of silty and clayey soils is frequently used to build linear transportation infrastructures.

Use of this technology in the context of hydraulic structures is gaining strong interest. It has indeed been demonstrated, thanks to former R&D works, that lime-treated soils can successfully fulfill a series of relevant functions as far as dams and levees are concerned : slope stability, low permeability, resistance to surface and internal erosion. Lab experiments and full-scale field measurements, completed by a careful review of existing infrastructures worldwide, substantiate this statement.

As part of the recent DigueELITE R&D project, the overflow resistance of a levee made with a lime-treated soil has been measured on a structure built on the Vidourle river (France). One of the outcomes of the project was the development of a measuring device for *in situ* evaluation of surface erosion, together with the corresponding test protocols and subsequent analysis. With this set-up, it was possible to demonstrate that the lime-treated soil was 5 to 10 times more resistant to overtopping than the same untreated soil, with a maximum improvement in the most sensitive zones (crest and toe).

After a brief recall of the impact of lime-treatment on relevant soil properties, this article presents:

- The results of the overflow trials on the full scale levees, and their interpretation,
- The consequences of the findings of the DigueELITE project in terms of levee and small dam design, including cost analysis,
- The overall project conclusions and further mid- and long-term perspectives.

# **BOREAL, Bio-renforcement des ouvrages hydrauliques en remblais**

## ***BOREAL, Bio-reinforcement of embankments by biocalcification***

**A. Esnault Filet<sup>1</sup>, I. Gutjahr<sup>1</sup>, A. Garandet<sup>2</sup>, A. Viglino<sup>3</sup>, R. Beguin<sup>4</sup>,  
O. Sibourg<sup>5</sup>, J.M. Monnier<sup>5</sup>, J. Martins<sup>6</sup>,  
L. Oxarango<sup>6</sup>, L. Spadini<sup>6</sup>, C. Geindreau<sup>7</sup>, F. Emeriault<sup>7</sup>, S. Castanier  
Perthuisot<sup>8</sup>**

<sup>1</sup> Soletanche Bachy, Rueil, [annette.esnault@soletanche-bachy.com](mailto:annette.esnault@soletanche-bachy.com)

<sup>2</sup> CNR Cacoh, Lyon, [a.garanet@cnr.tm.fr](mailto:a.garanet@cnr.tm.fr)

EDF CIH, Chambéry, [amandine.viglino@edf.fr](mailto:amandine.viglino@edf.fr)

<sup>4</sup> GEOPHYCONSULT, Chambéry, [remi.beguin@geophyconsult.com](mailto:remi.beguin@geophyconsult.com)

<sup>5</sup> ENOVEO, Lyon, [jm.monier@enoveo.com](mailto:jm.monier@enoveo.com)

<sup>6</sup> IGE, Grenoble, [laurent.oxarango@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:laurent.oxarango@univ-grenoble-alpes.fr)

<sup>7</sup> 3SR, Grenoble, [fabrice.emeriault@3sr-grenoble.fr](mailto:fabrice.emeriault@3sr-grenoble.fr)

<sup>8</sup> Université Angers, Laboratoire Microbiogéologie,  
[sabine.castanier-perthuisot@univ-angers.fr](mailto:sabine.castanier-perthuisot@univ-angers.fr)

### **Résumé**

La consolidation des sols par voie biologique est une écotechnologie innovante qui imite les processus naturels de calcification pour cimenter le sol en place tout en laissant la porosité ouverte. Elle est obtenue par précipitation de la calcite dans des conditions biogéochimiques contrôlées. Le procédé a été validé au cours de plusieurs expérimentations, initialement en laboratoire puis sur chantiers sous conditions de nappe statique. Il est breveté et mis en application par Soletanche-Bachy.

Ce procédé de bio-calcification pourrait être appliqué pour le renforcement des ouvrages hydrauliques en charge (digues fluviales, canaux hydroélectriques et canaux d'irrigation), par rapport aux problématiques suivantes :

- le renforcement mécanique du noyau des remblais limono-sableux, vis-à-vis du risque d'érosion interne et de liquéfaction;
- le traitement des fondations de digues de fleuves et de canaux vis-à-vis de ces mêmes phénomènes. Les fondations ciblées sont des alluvions (sables, limons, graves).

Cependant, son application à des ouvrages hydrauliques en charge n'était jusqu'alors pas envisageable à cause des vitesses de percolation dans ces ouvrages. Le projet BOREAL (Bio-Renforcement des Ouvrages hydrauliques en remblais), s'est attaché à lever ce verrou technique. Notamment, la réalisation d'un modèle physique à échelle 1 a permis de valider la faisabilité des injections des solutions

dans différentes granulométries et configurations de sols et sous diverses conditions hydrauliques. Bien que le projet BOREAL ait ciblé initialement les digues en charge, son objectif premier est d'assurer le renforcement des ouvrages en remblais vis-à-vis des risques d'érosion interne ou de liquéfaction que ce soit le corps de l'ouvrage ou sa fondation. Le procédé a donc également des perspectives dans le domaine des digues de protections.

Les essais réalisés sur un modèle physique grande échelle CNR ont démontré que la réaction de biocalcification au sein d'un massif de sol sous écoulements, est efficace jusqu'à des vitesses de proche de  $10^{-3}$  m/s. Les différentes méthodes et études de caractérisations des matériaux traités, corrélées aux résultats obtenus sur ce modèle physique (pour l'érosion interne) et par modélisation numérique (pour la liquéfaction) ont permis de déterminer le taux de calcite nécessaire pour la consolidation vis-à-vis de l'érosion interne et de la liquéfaction.

Le passage au stade de démonstrateur *in situ*, permettra de valider les comportements et résultats observés sur le modèle physique, et plus particulièrement de valider la maîtrise du volume traité et son homogénéité, dans un contexte de nature hétérogène. Il permettra également de valider et optimiser les méthodes de contrôles employées dans le projet.

Les derniers mois du projet seront consacrés aux études sur des sites potentiels d'application sur les endiguements CNR et EDF, dans le but de rédiger un avant-projet sommaire préalable à la mise en œuvre, l'un par rapport au traitement d'une zone d'érosion interne (suffusion ou érosion de contact) et l'autre vis-à-vis du renforcement d'une zone potentiellement liquéfiable.

## Abstract

Bio calcification is a very recent *in situ* soil consolidation solution. It is obtained by calcite precipitation under controlled biogeochemical conditions. The process has been validated by several experiments, initially on laboratory scale then *in situ* on industrial scale under static groundwater conditions. Soletanche Bachy holds several patents for implementing the industrial process. However, it was necessary to modify the process in order to make it effective for its application on embankments due to potentially high ground water flows. This is one of the main aspects addressed in the BOREAL project (Bio-reinforcement of backfilled hydraulic structures), during a 4 year research and development program. In particular injection tests performed on scale 1 in a physical model allowed for the validation of the implementation feasibility in various soils grading and configurations and under several hydraulic conditions. Although the BOREAL project focusses on embankments, its prime objective is to contribute to the mitigation of erosion and liquefaction risks. Therefore, its results will also be transferrable to protective dikes. The results obtained from the physical model experiments will be presented showing the application fields of the process and the objectives in terms of treatments. Besides, these results are viewed in a context of real site *in situ* implementation. So, environmental aspects inherent to any hydraulic works reinforcement projects with potential impacts on groundwater are supported showing that the BOREAL process appears favorably as new industrial solution.

# **Solutions de traitement des essences ligneuses générant des risques sur les ouvrages hydrauliques**

## ***Treatment solutions for woody species creating risks on hydraulic structures***

**C. Zanetti<sup>1</sup>, N. Liency<sup>1</sup>, J. Macia<sup>1,2</sup>, C. Morris<sup>2</sup>,  
M. Vennetier<sup>3</sup>, P. Mériaux<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ARBEAUSOLutions, Belcodène, [c.zanetti@arbeausolutions.fr](mailto:c.zanetti@arbeausolutions.fr)

<sup>2</sup> Inra, UR Pathologie Végétale, Montfavet, [cindy.morris@inra.fr](mailto:cindy.morris@inra.fr)

<sup>3</sup> IRSTEA, UR Recover, Aix-en-Provence, [michel.vennetier@irstea.fr](mailto:michel.vennetier@irstea.fr)

### **Résumé**

Le cadre réglementaire concernant la sécurité et les obligations d'entretien et de surveillance des ouvrages hydrauliques s'est renforcé, tout comme celui relatif à l'utilisation des produits phytosanitaires, nuisibles pour l'environnement. Si cela incite les gestionnaires d'ouvrages à opter pour des pratiques plus durables et écoresponsables, ils sont confrontés à une complexification des opérations de gestion de la végétation.

Depuis les années 1970 et jusqu'en 2006 officiellement, les produits phytosanitaires étaient largement utilisés pour contrôler le développement de la végétation implantée sur les digues de protection contre les crues, les canaux ou les barrages, du fait de leur rapidité d'action et de leur faible coût de mise en œuvre.

Depuis l'arrêt de l'utilisation de ces produits, un développement important de pousses ligneuses est observé sur les parements des ouvrages. Parmi ces essences pionnières et hygrophiles, le peuplier est largement représenté. Son développement est très rapide lorsqu'il est implanté à proximité des cours d'eau, c'est-à-dire en ZNT « Zone-Non-Traitée » strictement interdite à l'usage des produits phytosanitaires.

Les méthodes de contrôle de la végétation ligneuse sont souvent mises en œuvre trop tard, une fois observés les dégâts dus aux racines ; les frais de remise en état des ouvrages sont alors très élevés.

Lorsque les systèmes racinaires se développent dans les parements des ouvrages dont les revêtements sont bitumineux, constitués de dalles bétonnées, de pierres de taille jointoyées ou d'enrochements, les matériaux peuvent se soulever, fissurer, et perdre leur fonction de protection et surtout d'étanchéité (Figure 1).

La coupe des arbres ou pousses ligneuses, généralement effectuée en première intention, aggrave le problème avec l'apparition de rejets et drageons accroissant les surfaces colonisées (Figure 2).

Face à cette problématique, de nouvelles solutions basées sur la physiologie des arbres ont été développées, dont certaines ont fait l'objet d'un dépôt de brevet. Elles permettent la dévitalisation de jeunes sujets, dans le respect de l'environnement et avant qu'ils n'aient généré de graves désordres (Figure 3). Les opérations de réparation des ouvrages sont ainsi fortement minimisées.

Dans la communication, les différents cadres réglementaires (sécurité des ouvrages hydrauliques et préservation de l'environnement) auxquels sont actuellement confrontés les gestionnaires en termes d'entretien de la végétation seront présentés. Les principes actuels, de la gestion courante aux opérations curatives de cette végétation, seront rappelés. Enfin, les innovations en cours de développement, notamment en termes de dévitalisation sélective des jeunes ligneux générant des dégradations sur les ouvrages hydrauliques, seront exposées.



FIGURE 1 : DESTRUCTURATION EN COURS D'UN PERRE MAÇONNE PAR UN PEUPLIER AYANT ETE RECEPE PLUSIEURS FOIS.



FIGURE 2 : JEUNES LIGNEUX IMPLANTES DANS UN REVETEMENT ETANCHE EN COURS DE DEPERISSEMENT, SUITE A DEVITALISATION

## Abstract

Since 1970 and until 2006, phytopharmaceutical products were used extensively to control vegetation development on dikes, dams and canals due to their high-speed action and their implementation low-cost. Phytopharmaceutical product prohibition induces a great expansion of vegetation on structure cladding. Pioneer trees species like poplar are largely represented. Implanted near water points they grow fast in phytopharmaceutical treatment prohibited zone.

Woody vegetation control methods are frequently implemented too late, when impacts caused by roots are observed; structure reparation costs are consequently very high.

New solutions based on trees physiology are in research and development with some news solutions for which a patent is pending. These new methods allow young tree devitalization in the respect of environment and before damages appear on hydraulic structures. Repairing operations are largely minimized.

In this communication the different regulatory frameworks are reminded. The current concepts of vegetation management and curatives actions are exposed. A part of innovative methods by selective devitalization of woody young species are revealed.



# **Guide technique CFBR**

## **Méthodes et techniques de confortement des digues**

### ***CFBR Technical guidance – Methods and technical solutions for levees reinforcement***

**D. Poulain<sup>1</sup>, M. Sutter<sup>1</sup>, R. Tourment<sup>1</sup>, J. Maurin,  
N. Auger<sup>2</sup>, C. Chevalier<sup>3</sup>, Y. Deniaud<sup>2</sup>, P. Ledoux<sup>2</sup>,  
T. Mallet<sup>4</sup>, J.C. Palacios<sup>5</sup>, M. Pinhas<sup>6</sup>,**

<sup>1</sup> IRSTEA, Aix-en-Provence et Bordeaux, [daniel.poulain@irstea.fr](mailto:daniel.poulain@irstea.fr)

<sup>2</sup> CEREMA, Blois, Brest et Aix-en-Provence, [yann.deniaud@cerema.fr](mailto:yann.deniaud@cerema.fr)

<sup>3</sup> IFSTTAR, Marne-la-Vallée, [christophe.chevalier@ifsttar.fr](mailto:christophe.chevalier@ifsttar.fr)

<sup>4</sup> SYMADREM, Arles, [Thibaut.MALLET@symadrem.fr](mailto:Thibaut.MALLET@symadrem.fr)

<sup>5</sup> SAFEGE, Nanterre, [jeancharles.palacios@safège.fr](mailto:jeancharles.palacios@safège.fr)

<sup>6</sup> AD Isère, Grenoble, [m.pinhas@adisere.fr](mailto:m.pinhas@adisere.fr)

## **Résumé**

Parallèlement à la prise en charge par l'État de la problématique des ouvrages de protection contre les inondations (réglementation, contrôle, financement à travers les PAPI et PSR), le CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) a mis en place un groupe de travail chargé de faire un état des méthodes utilisées en réparation (suite à désordres ou brèches) et confortement (suite à potentialité de désordre, constatées lors d'un diagnostic) des digues ; l'objectif fixé est de proposer des recommandations techniques pour chaque type de réparation et renforcement.

Ces travaux ont été menés sur la base de nombreux retours d'expérience. Plus de 150 chantiers de confortement ont été analysés, dont une trentaine ont été retenues comme fiches d'étude de cas, pour lesquels une ou plusieurs des techniques ont été mises en œuvre. Ces fiches d'étude de cas viennent compléter les près de 40 fiches techniques rédigées, décrivant des solutions potentielles aux domaines fonctionnels du confortement :

- Étanchéité interne ou sur parement coté eau : palplanches, jet grouting, parois minces ou moulées, mélanges en place, revêtement en sol peu perméable, masque béton ou maçonnerie ;
- Drainage et filtration : filtration sous recharge drainante, écrans filtrants, géotextiles filtrants, ouvrages de drainage sous recharge peu perméable, ouvrages de drainage sans recharge ;
- Stabilité : remblais composés de géoconteneurs, remblais renforcés, murs poids béton ou gabion, rideau de palplanches ;
- Rehausse : murettes anti—crue, rehausses anti—crue amovibles ;

- Protection externe : techniques mixtes et techniques végétales, enrochements liés ou non, perrés, blocs artificiels, épis de protection... ;
- Ouvrages inclus et traversants, transitions ;
- Gestion de la végétation arborée.

Ces fiches techniques se voulant utilisables par un large public (décideur, concepteur, réalisateur notamment), elles délivrent des informations de divers niveaux de technicité en traitant aussi bien des aspects de conception que de mise en œuvre. Par ailleurs, pour chacun des domaines fonctionnels les caractéristiques communes ainsi que des critères d'aide à la décision entre les différentes techniques sont présentés.

La présente communication fait une synthèse des travaux menés en présentant le document produit au travers de questionnements que peuvent se poser les intervenants d'un projet de confortement. On s'attache notamment à présenter la/les façon(s) dont ce guide pourra être utilisé en définissant :

- Le contenu des fiches techniques ;
- Des critères de choix de technique entre les différentes solutions proposées pour faire face à une défaillance des fonctions de stabilité et de rehausse.
- Des éléments techniques de conception et de mise en œuvre des techniques d'étanchéité interne consistant à un renforcement des sols en place (mélange en place, injection, jet grouting).

## **Abstract**

There are only a few years that French State takes in charge flood defense management issues. This was done through new regulation, control, and new funding framework like PAPI or PSR. In parallel, professional organizations are also working on flood defences: a working group of CFBR has the goal to describe methods that can be used to repair (after disorder or breach), reinforce or consolidate (after disorder suspicion, assessed during a diagnosis) a levee. The final document from this working group aims to include technical recommendations for each listed method.

Thanks to numerous case studies (150), almost 40 techniques were listed and organized in regard with their main functionality: inside or outside sealing, drainage, filtration, mechanical stability, enhancement, protection, crossing, included or transition work, vegetation management. Each of these techniques is described in detail in a specific form.

This communication's goal is to present the different ways to use these guidances: for different actors in the betterment of a levee like the decision-maker, the designer, the builder and for their different goal.

# Protections externes de digues : un Groupe de travail du CFBR présente des méthodes de réparation et confortement

## *Surface protections on levees: several types of remedial works*

**P. Ledoux<sup>1</sup>, E. Vuillermet<sup>2</sup>, O. Artières<sup>3</sup>, Y. Boussafir<sup>4</sup>,  
B. Chalus<sup>5</sup>, B. Cortier<sup>6</sup>, T. Monier<sup>7</sup>, A. Brune<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Cerema, Aix-en-Provence, [patrick.ledoux@cerema.fr](mailto:patrick.ledoux@cerema.fr)

<sup>2</sup> BRLi, Nîmes, [Eric.Vuillermet@brli.fr](mailto:Eric.Vuillermet@brli.fr)

<sup>3</sup> TENCATE, Bezons, [o.artieres@TENCATE.com](mailto:o.artieres@TENCATE.com)

<sup>4</sup> Ifsttar, Marne-La-Vallée, [yasmina.boussafir@ifsttar.fr](mailto:yasmina.boussafir@ifsttar.fr)

<sup>5</sup> CNR, Lyon, [B.Chalus@cnr.tm.fr](mailto:B.Chalus@cnr.tm.fr)

<sup>6</sup> Setec Hydratec, Lyon, [Cortier@hydra.setec.fr](mailto:Cortier@hydra.setec.fr)

<sup>7</sup> Artelia, Grenoble, [Thierry.MONIER@arteliagroup.com](mailto:Thierry.MONIER@arteliagroup.com)

### Résumé

Cette communication s'attache à décrire quelques techniques de protection externe des digues de protection contre les inondations fluviales et les submersions marines, leurs principes de dimensionnement et les aspects essentiels des travaux sur ces ouvrages.

La « protection externe » regroupe les composants structurels de la digue dont la fonction géotechnique principale est la résistance à l'érosion externe. Celle-ci regroupe tous les mécanismes qui provoquent un départ de matériaux sous l'effet de sollicitations s'appliquant sur la surface extérieure de la digue et provenant de l'action de l'eau ou d'autres agents.

La protection externe est également employée pour résister aux agressions externes dues aux animaux fouisseurs, aux racines, aux actions anthropiques...

La protection externe peut, selon les techniques utilisées et les conditions dans lesquelles elle est employée, contribuer à d'autres fonctions comme la stabilité mécanique d'ensemble, l'étanchéité, l'auto-filtration ou le drainage.

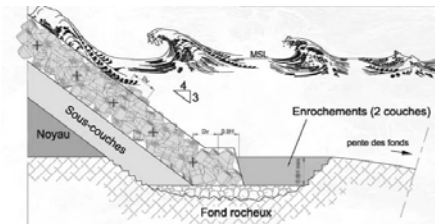
Cet article développe notamment les points suivants :

- la structure et la pose des blocs artificiels ;
- les principes de dimensionnement et la méthodologie de mise en œuvre des techniques mixtes ;
- les principes de dimensionnement et conception pour les palplanches posées en butée de pied ;

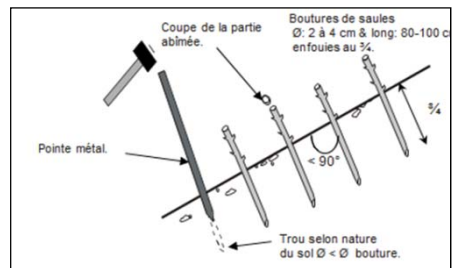
- le diagnostic et la conception des réparations des perrés maçonnés et en béton ;
- les différents types et les principes de dimensionnement.

Selon les techniques utilisées pour la protection externe, d'autres fonctions utiles à l'intégrité de la digue et à la conservation de ses performances peuvent également être assurées par le dispositif, telles que :

- l'intégration paysagère et le gain en biodiversité pour les techniques mixtes ;
- le soutènement et la limitation du risque d'érosion interne pour les palplanches posées en butée de pied ;
- la stabilité de talus et l'étanchéité pour les perrés ;
- les réparations d'urgence et la rehausse d'ouvrage pour les sacs et les tubes géotextile remplis de sable.



EXEMPLE D'UNE CARAPACE POSEE SUR FOND ROCHEUX



PRINCIPE DE MISE EN ŒUVRE DES BOUTURES DANS UNE PROTECTION MINERALE

## Abstract

This publication aims at introducing several types of surface protections on coastal and fluvial levees. It describes their design principles and key points of their construction process. « Surface protection » refers to structural components of levees, which have a geotechnical function to contain external erosion, under water action or other external aggression.

Surface protection is also necessary to resist damages due to burrowing animals, roots or human activities...

Depending on the technic used and external conditions, surface protection may also improve other functions of the levees such as mechanical stability, impermeability or drainage.

This article also describes the advantages of some of these technics of surface protection in landscaping incorporation, or their convenience in crisis management.

Technics described in this paper are:

- armourstones,
- joint technics,
- steel sheet pilings at the toe of embankments,
- masonry protection,
- tubes and geotextiles filled with sand;
- continuous concrete protection.

# **Confortement de la digue du Grand Rhône La solution géocomposite face aux matériaux sableux et granulaires**

## ***Reinforcement of the Grand Rhône dyke – Geocomposite solution vs sandy and granular materials***

**A. Hérault<sup>1</sup>, M. Normand<sup>2</sup>, A. Skotarczak<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Low & Bonar, Antony, [alain.herault@lowandbonar.com](mailto:alain.herault@lowandbonar.com)

<sup>2</sup> Egis Eau, Montpellier, [mathieu.normand@egis.fr](mailto:mathieu.normand@egis.fr)

<sup>3</sup> Guintoli, Arles, [askotarczak@guintoli.fr](mailto:askotarczak@guintoli.fr)

### **Résumé**

La partie aval du Rhône et son delta en Camargue sont protégés par des digues anciennes qui ont été édifiées et rehaussées progressivement au cours des derniers siècles. Suite à la crue exceptionnelle de décembre 2003, un programme de sécurisation de ces ouvrages est porté par le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM) dans le cadre général du Plan Rhône.

Différentes solutions de confortement de la digue du Grand Rhône rive gauche entre Prends-Té-Garde et Grand Mollégès ont été étudiées, chiffrées, et détaillées par EGIS EAU. À l'issue des études d'avant-projet, le SYMADREM a retenu un principe de confortement reposant sur la reconstruction complète de la digue avec un remblai étanche et clef d'ancrage côté fleuve et un remblai moins technique côté terre ; les deux structures sont séparées par un dispositif de filtration et de drainage.

La solution de confortement retenue garantit une fonction étanchéité à court terme. Le contrôle de la piézométrie interne au remblai est effectué par le drain, qui permet à la digue une meilleure durabilité dans la mesure où la partie aval de la digue n'est jamais impactée par les écoulements internes quel que soit l'état de saturation de sa partie amont, y compris en cas de défaillance du masque étanche. Le drain de pied aval permet également d'intercepter les écoulements dans la fondation et d'éviter les phénomènes d'érosion interne à proximité du pied de talus aval, quelle que soit la nature de la fondation.

Le dispositif de filtration et de drainage augmente très sensiblement la sécurité de l'ouvrage au regard des risques d'érosion interne en cas de défaillance de l'organe d'étanchéité amont (fissures ou galeries éventuelles qui pourraient être le siège d'écoulements préférentiels en période de crue). Les dispositifs de filtration et de drainage envisagés sur la partie aval de la digue, et comparés dans cette communication, étaient composés d'un drain en matériaux sableux auto filtrants,

avec respect d'une règle de filtre, d'un drain granulaire dans une chaussette géotextile et d'un géocomposite de drainage et de filtration Enkadrain® Wide de chez Low & Bonar assurant également la fonction séparation. Cette dernière solution a été retenue par le SYMADREM et effectivement mise en œuvre par l'entreprise GUINTOLI.

Dispositif industriel de qualité maîtrisée, apportant une bien meilleure garantie sur la fonctionnalité de la solution, le géocomposite de drainage et filtration présentait d'importants atouts tant techniques qu'économiques face aux matériaux sableux auto filtrant ou granulaires. Sur le plan environnemental, il préservait les ressources en matériaux de carrière : 63 000 m<sup>3</sup> de matériaux drainants auraient été nécessaires sur le linéaire du projet ; il a également permis de réduire considérablement le transport de matériaux et, par conséquent, les émissions de CO<sub>2</sub> avec une économie de 250 000 km de trajets de poids lourds. Sur les aspects relatifs au chantier, le géocomposite a évité les problèmes de gestion des approvisionnements, de stockage et de reprise de matériaux, et sa mise en œuvre, facile et rapide avec notamment une seule nappe à poser au lieu de deux, s'est traduite par un gain de temps pour l'entreprise par rapport aux solutions granulaires, avec des risques de non conformités réduits pour la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage. Cette solution géocomposite entre désormais dans le panel des solutions existantes pour que les maîtres d'ouvrages puissent augmenter la sécurité de leurs ouvrages à des coûts qui restent acceptables.

### **Abstract**

The downstream part of the Rhone and its delta in the Camargue are protected by old dikes. Following the exceptional flood of December 2003, it was decided to reinforce these structures. The principle of strengthening which was retained is based on the complete reconstruction of the dike with a waterproof embankment on the river side and an anchoring key to the axis of the structure, supported by a less technical backfill on the other side; the two structures are separated by a filtration and drainage system. Several solutions have been considered for this system: a drain made of self-filtering sand materials, a drain made of granular materials in a geotextile sock and the geosynthetic solution consisting of a geocomposite for drainage and filtration which was finally applied. The latter solution significantly reduced material transportation and supply and storage management issues. The easy installation of geocomposite compared to granular solutions was an additional asset for the contractor with reduction of the risk of quality issues for the project management.

# **Confortement des endiguements de la Rivière des Galets sur l'île de la Réunion Conception et mise en œuvre de blocs artificiels attachés**

## ***Remediation of dykes of the Riviere des Galets on Reunion Island – Conception and implementation of attached concrete blocks***

**J. Vanwarreghem<sup>1</sup>, F. Fruchart<sup>2</sup>, J. Aubonnet<sup>1</sup>,  
J.-B. Bruzy<sup>3</sup>, A. Quanquin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> BRLingénierie, Nîmes, [julien.vanwarreghem@brl.fr](mailto:julien.vanwarreghem@brl.fr)

<sup>2</sup> Easy Hydro, Lyon, [fruchart.lyon@gmail.com](mailto:fruchart.lyon@gmail.com)

<sup>3</sup> Territoire de la Côte Ouest, le Port, [jean-baptiste.bruzy@tco.re](mailto:jean-baptiste.bruzy@tco.re)

### **Résumé**

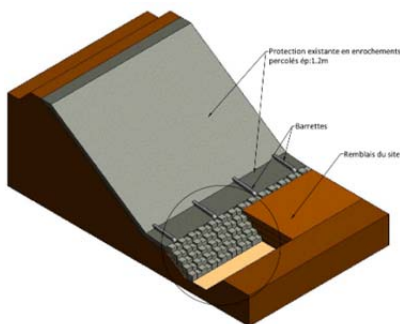
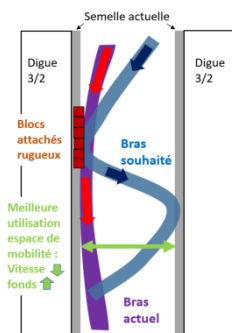
L'île de la Réunion détient des records mondiaux de pluviométrie. Les rivières de l'île subissent des crues d'une extrême violence, avec une capacité érosive hors du commun et des vitesses pouvant dépasser 10m/s.

La rivière des Galets traverse des zones urbanisées menacées chaque année par les crues. Dans les années 1990, à l'appui de modèles physiques, d'importants aménagements sont initiés.

Les berges d'une vingtaine de mètres de hauteur sont alors protégées par des endiguements en enrochements bétonnés en aval et des épis écarteurs en amont. À la suite de récents épisodes cycloniques, la partie endiguée, jugée trop lisse, est attaquée en pied par les crues de manière plus importante que les prévisions. L'ouvrage menace de rompre. La sécurité des personnes et des biens est en jeu, il faut innover pour conforter ces ouvrages.

BRL ingénierie s'associe avec M. Francis FRUCHART à l'origine du concept novateur des digues répulsives, pour répondre à la demande du Syndicat Intercommunal de la Rivière des Galets, qui doit rapidement conforter et améliorer la sûreté des digues de protection des populations.

Force est de constater qu'aucun bloc libre, naturel ou artificiel issu du maritime, ne résisterait aux vitesses rencontrées. Il faut donc impérativement les attacher. La solution technique proposée consiste, puisque les digues sont trop lisses, à les rendre rugueuses en appliquant le concept des digues répulsives.



## CONCEPT DE DIGUE REPULSIVE ET MODELE 3D - © F.FRUCHART/BRL INGENIERIE

La protection mise en œuvre consistera à agencer des blocs béton cubiques de 1,5 m de côté depuis le pied de la semelle sur 5 m de profondeur selon une pente à 3H/2V. Il s'agira de disposer les blocs en quinconce : chaque profil de blocs sera mis en place avec 50 cm de décalage vertical alternatif. Les blocs équipés de réservations seront ensuite attachés entre eux sur chaque profil en travers et sur chaque profil en long par des câbles.

Les travaux ont débuté en septembre 2018. Un des enjeux principal du chantier réside dans la fabrication des blocs et leur bonne mise en œuvre validées par plusieurs planches d'essais.

Ce procédé n'est pas réservé à l'île de la Réunion, et peut s'appliquer à toutes rivières, fleuves ou torrents à fortes vitesses lorsqu'il n'y a pas de gros blocs naturels de bonne qualité à proximité.

## Abstract

The concept and development of artificial blocks attached to each other by cables, patented by Francis FRUCHART and BRLingénierie, corresponds to a real need for dyke protection on Reunion island, knowing that the flood velocities can exceed 10 m/s, particularly when no free natural on site or existing artificial block is stable. The client is the Syndicat Intercommunal à Vocation Unique (SIVU) de la Rivière des Galets, institutionally replaced by the Territoire de la Côte Ouest (TCO) since January 2018. This solution was chosen to reinforce the existing dykes, made of mass cyclopean concrete, which required a serious reinforcement.

The Design is completed and the works will begin in September 2018, on a length of 250 to 300 m on each bank. The works will be presented at the Colloque Digue 2019.

This process is not restricted to Réunion Island, but is applicable overseas to all rivers or torrents at high speeds, especially when there are no large natural blocks of good quality nearby. This process is under patent: rights are reserved, no use can be made without the prior consent of the authors.



# Travaux de confortement de la digue des Alliés à Dunkerque

## *Reinforcement of the Alliés dike in Dunkirk*

X. Hamard<sup>1</sup>, N. Nerinx<sup>1</sup>,  
G. Brassart<sup>2</sup>, C. Doumeng<sup>2</sup>, A. Moubariki<sup>3</sup>, S. Partouche<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ISL Ingénierie, Lille, [hamard@isl.fr](mailto:hamard@isl.fr)

<sup>2</sup> DREAL Hauts de France, Lille, [gregory.brassart@developpement-durable.gouv.fr](mailto:gregory.brassart@developpement-durable.gouv.fr)

<sup>3</sup> Grand Port Maritime de Dunkerque, Dunkerque, [moubarikia@portdedunkerque.fr](mailto:moubarikia@portdedunkerque.fr)

<sup>4</sup> NGE Fondations groupe NGE, Lyon, [spartouche@ngefondations.fr](mailto:spartouche@ngefondations.fr)

### Résumé

La digue des Alliés est un ouvrage de 900 m de longueur appartenant à l'État, sous maîtrise d'ouvrage déléguée au Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD). Elle sépare la mer du canal Exutoire, l'un des principaux exutoires à la mer des eaux continentales des Wateringues. La digue protège environ 17 000 personnes de l'arrière-pays dunkerquois.



FIGURE 1 : LOCALISATION DE LA DIGUE DES ALLIES (FOND GOOGLE EARTH)

La digue a été édifée en 1876 et a fait l'objet de travaux de réparation importants notamment suite aux tempêtes de 1949 et 1953 qui ont chacune occasionné des brèches. Sa structure est atypique : un noyau béton, des recharges sableuses de part et d'autre, un parement côté mer en maçonneries en pente douce et un parement côté canal revêtu de dalles en béton armé.

La digue des Alliés est le siège d'infiltrations sous l'effet des gradients imposés par la marée et par le marnage quotidien du canal qui ont été à l'origine d'une érosion interne avérée, suite à laquelle des désordres importants sont apparus, en particulier sur le parement et en crête avec un affaissement au droit de la zone reconstruite après la brèche de 1949.

Suite à différentes études, et en complément d'une opération massive de rechargement en sable de la plage devant la digue, des travaux de confortement ont été réalisés de juin 2017 à juillet 2018. Les conditions d'intervention sont complexes, en particulier en pied côté canal noyé par le canal Exutoire, dont le

niveau varie en fonction des marées et des apports en eaux continentales.

L'article présente le contexte de l'opération et les travaux qui ont consisté en :

- la mise en œuvre de palplanches par moyens fluviaux,
- la réalisation d'un complexe de drainage filtration granulaire en pied,
- la reprise partielle du parement côté canal,
- le comblement des cavités par injection basse pression,
- la reprise de la crête, avec mise en œuvre de micro-pieux



FIGURE 2 : MISE EN ŒUVRE DES PALPLANCHES PAR VOIE FLUVIALE

### **Abstract**

This paper presents the reinforcement works of the Alliés dike in Dunkirk. The 900 m dike protects 17 000 inhabitants of Dunkirk area against sea-flooding. It is also a limit between the North Sea and the “canal Exutoire”, the main outlet of the Dunkirk polder. It is currently state owned.

The current dike has been built in 1876, and reconstructed twice, after the 1949 and 1953 storms that each caused breaches.

The dike is made of a concrete core, with sandy fills on sea and canal sides. The slope at sea side is protected by masonry and at canal side by anchored reinforced concrete slabs.

The dike is attacked by severe internal erosion because of internal flows due to sea tide but also due to daily canal level variation. This led to severe damages, particularly on the stretch rebuilt after the 1949 storm, with numerous broken protection slabs, large voids underneath and crest lowering.

After several studies and massive reclamation works behind the dike, reinforcement works were conducted from June 2017 to July 2018.

Work conditions are complex, especially at the toe at canal side as it is under water with a level varying daily.

This paper presents the context of the dike and the following works:

- Sheet piling with help of a barge on the canal,
- Realization of a granular filter and drain system at the toe at canal side
- Refurbishment of the reinforced concrete protection structure at canal side
- Void filling by low pressure injection
- Crest rehabilitation with micropiles.

# Projet d'aménagement du Port de Brest

## *Brest Harbor extension project*

R. Mattras<sup>1</sup>, C. Bennehard<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Egis Structures et Environnement, Grenoble, [remy.mattras@egis.fr](mailto:remy.mattras@egis.fr)

<sup>2</sup> Egis Ports, Brest, [charlotte.bennehard@egis.fr](mailto:charlotte.bennehard@egis.fr)

### Résumé

La Région Bretagne, propriétaire du Port de Brest depuis 2007, a confié à Egis la conception et la maîtrise d'Œuvre des Travaux maritimes de l'extension du Port de Brest. Le projet, à vocation environnementale, a pour but la création d'une plateforme dédiée à la production d'installations EMR (production d'Énergie Marine Renouvelable).

Les travaux débutés en 2017 comprennent la réalisation d'un quai de chargement des EMR de 400 m de longueur proposant un tirant d'eau de 12 m à marée basse, d'une digue d'enclôture de 850 m de longueur, d'une plateforme poldérisée de 12 hectares, ainsi que le dragage du chenal d'accès et de la souille pour plus d'un million de mètres cubes.

Du fait de la forte amplitude des marées qui fluctuent localement entre +0,25 mCM et +7,93 mCM, les cotes de plateforme et de sommet de quai se trouvent à +10 mCM, le fond marin initial avant travaux étant situé à la cote -2 mCM.

Au stade de l'appel d'offre, les groupements attributaires des deux principaux lots maritimes ont été retenus sur la base de solutions variantes :

- Pour la digue d'enclôture, le groupement Bouygues a proposé de substituer la digue à talus par une gabionnade de palplanches avec protection en enrochements côté mer,
- Pour le quai EMR, le groupement Vinci réalise un double rideau de combiwall, avec tirants internes en palplanches plates.

Au niveau géotechnique, les ouvrages sont implantés dans le contexte particulier de la rade de Brest : le substratum schisteux est recouvert par une épaisseur conséquente de sables, limons et vases particulièrement compressibles, qui ont conduit le concepteur et les entreprises à faire appel à différentes techniques d'amélioration ou renforcement de sol : drainage vertical, soil mixing, jet grouting.

L'article présente les contraintes du projet, sa conception, ainsi que la réalisation des travaux en cours. Les marchés de dragage, poldérisation, et consolidation du futur polder en vue de son exploitation, débiteront courant 2019.

### **Abstract**

Egis is in charge of the design and work control for the project of Brest Harbor extension.

The main works concern the creation of installations aimed at developing Renewable Marine Energy.

Works have started in 2017, with the construction of a 400meter long quay, a 850meter long dike, a 12ha polder, and dredging works of the harbor.

Geotechnical and hydraulic conditions, with significant thickness of existing mud, led the designer and the contractors to use particular soil improvement methods such as vertical drainage, soil mixing and jet grouting.

# **Protection maritime d'un remblai ferroviaire en éléments modulaires renforcés par géotextiles, Saint-Laurent-d'Eze**

## ***Maritime protection of railway backfill by modular blocks reinforced with geotextiles, Saint-Laurent-d'Eze beach***

**D. Rossi<sup>1</sup>, O. Wyss<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Betoconcept, Nice, [infos@betoconcept.com](mailto:infos@betoconcept.com)

### **Résumé**

La stabilisation des bords de mer est une opération délicate du fait de l'érosion permanente des matériaux en contact avec les courants marins.

Dès 2010 des désordres ont été constatés sur le talus, qui apparaît très instable avec des éboulements de gros blocs rocheux, accompagnés d'éboulis. Le mur de protection détruit depuis de nombreuses années, et la largeur de plage très étroite (5 à 10 m) n'assurent plus, lors de tempêtes, la protection contre l'agression des houles issues des secteurs sud-sud-est à sud-sud-ouest.

Le remblai sur lequel est établi la voie ferrée a été largement déstabilisé, réduisant de façon significative le pied de celui-ci. La longueur concernée par le confortement est de 45 m, le but étant de protéger le talus ferroviaire contre l'érosion externe régressive.

Il convenait d'entreprendre des travaux pour construire un nouveau mur capable de résister à l'action des vagues et protéger la base du talus.

En mai 2012, une campagne de reconnaissances géotechniques et d'opérations topographiques et bathymétriques a été organisée par le gestionnaire de l'infrastructure ferroviaire. Un dossier d'avant-projet avait été bâti à la suite de ces investigations de terrain proposant différents procédés de confortements.

La solution retenue par la SNCF, maître de l'ouvrage a été celle associant l'utilisation de géotextiles de renforcement à des éléments modulaires béton Leromur<sup>®</sup>. En plus d'être efficace sur du long terme, cette solution présente l'avantage de posséder une faible emprise au sol, ce qui est opportun au vu de la situation dans laquelle s'inscrit le projet (plage étroite). De plus, étant donné l'inaccessibilité du site par les engins de travaux, et pour limiter autant que possible les impacts environnementaux sur cette zone naturelle, le chantier ne pouvait être approvisionné en matériaux directement que par voie aérienne. Le conditionnement des modules sur palettes facilitait les opérations d'hélicoptage.

De plus les éléments sont manportables ne nécessitant pas d'engins de levage. Les rangées supérieures sont facilement mises en place. Les nappes de géotextile sont pincées entre deux rangées d'éléments. Pour cet ouvrage, le géotextile joue le rôle de renfort. Il doit assurer impérativement deux fonctions pendant toute la durée de service de l'ouvrage : le maintien de la résistance mécanique, et la tenue vis-à-vis de l'altération physico-chimique.

Un modèle de propagation de la houle a été mis en œuvre pour la zone de projet afin de définir les contraintes de houle au niveau de la plage. Les houles de secteurs sud-sud-est et sud-sud-ouest ont été sélectionnées car elles sont celles qui impactent le plus le projet.

Les murs ont fait l'objet de calculs au glissement, renversement et poinçonnement. La stabilité de l'ouvrage est justifiée en considérant un mur poids défini par les éléments Leromur® associés aux nappes de géotextile. Les stabilités internes, mixtes, et générales ont été vérifiées selon la méthode des tranches.

Les travaux réalisés durant l'été 2017 ont consisté à venir conforter le pied de remblai au moyen d'un ouvrage qui devra : reconstituer une butée pour le remblai ferroviaire, résister aux coups de mer, et être stable vis-à-vis des usagers de la plage. L'ouvrage en service depuis le mois de juillet 2017, a parfaitement joué son rôle, notamment lors des violentes intempéries du mois de décembre 2017, suivi du passage de la tempête Eleanor en janvier 2018.

### **Abstract**

Coastal stabilisation is a delicate operation because of the permanent erosion of the materials in contact with the marine currents. This article presents a sea defence wall, below the line linking Marseille and Ventimiglia between the stations of Eze and Cap d'Ail, at the beach of Saint Laurent d'Eze. Between KP 235,700 and KP 235,752, the embankment on which the railway is established has been largely destabilised significantly reducing the base of embankment. The length concerned by the operation is 45 ml, the aim being to protect the embankment against progressive erosion. Urgent work was needed to build a new wall capable of resisting wave action and protecting the base of the embankment. A wave propagation model was implemented for the project area to define wave constraints at the beach level. Given the inaccessibility of the site by the construction equipment, and to limit as much as possible the environmental impacts on this natural area, the site could only be supplied with materials directly by a helicopter. This is the Leromur® solution in concrete modular elements combined with a backfill reinforced with geosynthetic layers selected by the client. The work carried out during the summer of 2017 consisted of reinforcing the base of embankment with a wall that reconstitutes a face for the embankment that is able to resist the sea erosion as well as being stable for users of the beach.

# **Retour d'expérience sur les travaux post-Xynthia en Pays de la Loire**

## ***Feedback on post-Xynthia constructions in Pays de la Loire***

**F. Leseur<sup>1</sup>, F. Pondevie<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> DREAL Pays de Loire, Nantes, [frederic.leseur@developpement-durable.gouv.fr](mailto:frederic.leseur@developpement-durable.gouv.fr)

### **Résumé**

Les 27 et 28 février 2010, les Pays de la Loire ont été touchés par la tempête Xynthia. Cet épisode particulièrement violent et dévastateur restera gravé dans les mémoires, par le nombre de ses victimes et par l'ampleur des dégâts causés. Ces dégâts ont nécessité des réparations d'urgence puis des confortements et/ou rehausses pérennes des digues. Pour ces opérations, les gestionnaires sont accompagnés par le Service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques de la DREAL des Pays de la Loire (ministère de la transition écologique et solidaire), qui procède aussi à des inspections réglementaires et techniques des digues. Il est fait le constat que l'efficacité et la pérennité des travaux ne sont pas à la hauteur de ce qui était attendu.

Dans cette publication intitulée « Retour d'expérience sur les travaux post-Xynthia en Pays de la Loire », Frédéric Leseur et Frédéric Pondevie (direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays de la Loire, ministère de la transition écologique et solidaire) présentent un retour d'expérience sur ces opérations. Par type d'ouvrage, elle fait le point sur les problèmes rencontrés par l'emploi de certains matériaux et/ou certaines méthodes de mise en œuvre, et explique sommairement les raisons de ces difficultés. Dans la mesure du possible, ces expériences aboutissent à des pistes potentielles d'amélioration pour tous les acteurs.

La publication rappelle l'intérêt des reconnaissances topographiques et géotechniques préalables, et la nécessité de mener le plus loin possible les investigations, les analyses et les calculs en phase avant-projet, pour les configurations à venir et pour la phase de leur réalisation. La publication aborde aussi l'importance de la communication auprès du public afin que leurs propres actions ne nuisent pas à la pérennité des ouvrages.

## **Abstract**

On February 27 and 28, 2010, the region of Pays de la Loire was hit by the storm Xynthia. This particularly violent and devastating episode will remain etched in memory by the number of its victims and by the extent of the damage caused. This damage generated necessitated emergency repairs and then reinforcements and/or permanent extensions of the regional levees. The administrators are accompanied Management is supported for these operations by the Service of control of the and safety of the hydraulic structures of the DREAL of Pays de la Loire (Ministry of Ecological and Solidarity Transition), which also carries out regulatory and technical inspections of the levees. These actions sometimes show that the efficiency and sustainability of the work are not up to what was initial expectations expected.

In this publication entitled "Feedback on post-Xynthia work in the Pays de la Loire", Frédéric Leseur and Frédéric Pondevie (Regional Directorate for the Environment, Planning and Housing of Pays de la Loire, Ministry of the ecological and solidarity transition) present feedback on these operations. By type of construction, it takes stock of the problems encountered by the use of certain materials and/or certain methods of implementation and explains briefly the reasons for these difficulties. These experiences lead to potential improvements for all actors involved as far as possible.

This publication recalls the interest raises awareness of the importance of prior preliminary topographical and geotechnical reconnaissance, and the need to conduct, as far as possible, the investigations, analyzes analyses and calculations in the upstream phase for the future configurations and for the phase of their realization implementation phase. This publication also treats raises the importance of communication communicating these issues to the public at large so that their own actions do not harm the sustainability of the works.



# Index des auteurs

Abadie.....	71	Brune.....	63, 169
Ageorges.....	45	Bruzy.....	173
Albouze.....	113	Byron.....	91
Andries.....	73	Calvar.....	39
Antoine.....	113	Cambefort.....	129
Arnaud.....	77	Capdevielle.....	49
Artières.....	169	Carlados.....	131
Aubonnet.....	173	Castagnet.....	23, 135
Auger.....	167	Castanier Perthuisot.....	163
Azemard.....	123	Chalus.....	41, 107, 169
Bacchi.....	101	Chaouch.....	91
Baills.....	45	Chardès.....	135
Bambara.....	89	Charles.....	25
Barbet.....	43, 69	Charrier.....	91, 93
Bayart.....	55	Chaussée.....	111, 151
Beguïn.....	99, 115, 163	Chevalier.....	75, 85, 167
Benahmed.....	81	Chevrier.....	121
Bendahmane.....	83	Colin.....	129
Bennehard.....	177	Cornacchioli.....	161
Bernard.....	153	Cortier.....	169
Berthelot.....	69	Côte.....	109
Bertoldo.....	75	Coudray.....	121
Bertrand.....	101	Coulet.....	143
Beullac.....	63, 127, 129, 153	Courivaud.....	99, 111, 115
Beureno.....	73	Cousteau.....	121
Bidault.....	59	Croix.....	39
Biscay.....	113	Curt.....	31, 89
Blin.....	119	Cuvillier.....	67, 133
Boggio.....	113	Darthos.....	49
Boissin.....	55	Dast.....	135
Bonelli.....	91, 93, 161	De Baecque.....	75, 85
Bonnafé.....	55	De Bonviller.....	137
Bontemps.....	133	De Paris.....	75
Bottema.....	29	Delaunay.....	145, 151
Boucher.....	99	Deniaud.....	67, 129, 167
Boulay.....	53	Denizot.....	47
Boulet.....	21	Dermenonville.....	149
Boussafir.....	87, 169	Deroo.....	35
Boutonnier.....	47, 149	Dezert.....	109
Brassart.....	175	Di Maiolo.....	31
Braud.....	133	Doumeng.....	175
Brossard.....	117	Duchesne.....	117
Broust.....	31	Dugor.....	45

Dupont.....	45	Le Kouby.....	143
Durand.....	87, 143	Le Peillet.....	47, 149
Eenselme.....	53	Lebreton.....	67
Emeriault.....	163	Ledoux.....	129, 167, 169
Esnault Filet.....	163	Lemaire.....	19
Faisant.....	75	Leseur.....	181
Fargier.....	109	Lesueur.....	161
Faure.....	117	Liency.....	165
Félix.....	31	Liquet.....	71
Fernandes.....	147	Macia.....	165
Fernez.....	37	Mallet.....	75, 97, 111, 135, 145, 151, 157, 159, 167
Forquenot de la Fortelle.....	109	Manceau.....	143
Fouquet.....	131	Manin.....	47, 149
Frézet.....	149	Marliac.....	49
Fruchart.....	173	Marot.....	83
Fry.....	97, 135	Martinez.....	137
Galabrun.....	49	Martins.....	163
Garandet.....	163	Matras.....	177
Garau.....	119	Maurin.....	61, 127, 167
Garnier.....	123	Mazel.....	37
Gaspari.....	43	Mercier F.....	73
Geindreau.....	163	Mercier P.....	145, 151, 157, 159
Gelet.....	83	Mériaux.....	61, 63, 89, 97, 165
Gendrey.....	75, 123	Meunier.....	37
Gilbert.....	147, 157	Mével.....	105
Giunta Fornasin.....	21	Moiroud.....	41
Golay.....	93	Monier.....	169
Gonzalez.....	49	Monnier.....	163
Granjon.....	41	Moras.....	99
Gremeaux.....	91	Moreau.....	57
Guay.....	41	Morisseau.....	117
Guidoux.....	111	Morris.....	165
Gutjahr.....	163	Mortier.....	31
Hamard.....	175	Moubariki.....	175
Hérault.....	171	Navarro.....	19
Herrier.....	161	Nerincx.....	161, 175
Heurtefeux.....	21	Neyens.....	121
Huveteau.....	49, 137	Nguyen.....	81
Inaudi.....	119	Nicaise.....	91, 161
Jacopin.....	73	Noblet.....	105
Jalinoux.....	41	Normand.....	145, 159, 171
Jeannot.....	75	Oxarango.....	163
Jeuck.....	93	Palacios.....	167
Kuss.....	131	Palma Lopes.....	85, 109
Larroque.....	71	Paquier.....	95
Le.....	83, 107	Partouche.....	175
Le Feuvre.....	85		

Patouillard .....	23, 61, 127, 133, 143	Savatier .....	49
Payan .....	123	Schleyer-Lindenmann .....	75
Peeters.....	29	Sénéchal.....	51
Pelt.....	153	Serve .....	107
Perrin .....	23, 31	Seurot.....	69
Perset.....	151	Sibourg .....	163
Peyras .....	75, 89	Simm .....	29
Pezard .....	121	Skotarczak .....	171
Pheulpin.....	101	Slomp .....	35
Philippe .....	81	Sorin .....	113
Picault .....	99	Sossenkina.....	29
Pierrot-Deseilligny .....	113	Soulat .....	55
Pinchart.....	149	Sous.....	71, 77
Pinettes.....	99	Spadini.....	163
Pinhas .....	167	Sutter .....	153, 167
Piton.....	131	Tachker.....	161
Plastre .....	141	Tardieu .....	53, 69
Platz .....	23	Tekatlian.....	75
Pohl.....	29	Tena .....	137
Poncet.....	71	Théron.....	51
Pondevie .....	181	Thouvenin .....	141
Poulain.....	167	Touboul.....	77
Prost.....	51, 159	Tourment ..	23, 29, 31, 61, 87, 89, 97, 109, 113, 127, 129, 131, 153, 167
Puiatti .....	161	Trmal .....	67, 129
Quanquin .....	173	Van .....	29
Quefféléan .....	127, 131	VanLiempt.....	113
Rabatel.....	113	Vanloot.....	89
Raillard.....	155	Vanwarreghem.....	147, 173
Reiffsteck .....	85, 87	Vennetier .....	89, 165
Requi.....	135	Veylon .....	87
Rey .....	77	Viglino .....	163
Richert .....	27	Vinay .....	99
Rihouey.....	45	Vuillermet .....	147, 157, 169
Rossi.....	179	Wyss.....	179
Rousselot .....	43	Zanetti.....	165
Rushworth .....	29	Zhang.....	83
Salmi .....	51, 159	Zhong .....	83
Saussaye .....	87, 143		



## ORGANISATEUR



## PARTENAIRES



## PARTENAIRE POUR LA VISITE D'OUVRAGES



## AVEC LE SOUTIEN DE



ISBN : 978-2-7592-3000-6



Non commercialisé