

RECUEIL DES RÉSUMÉS

Systèmes et ouvrages de protection contre les inondations d'origines maritimes et fluviales

Sous la direction de Rémy Tourment et Laurent Peyras

4^e COLLOQUE - Dignes 2024
Aix-en-Provence

27-29
MARS
2024



© SYMBHIT - Dupont-Renoux



© Rémy Tourment (INRAE)



© Credits Photos - Sébastien P. Acoullas (OREAL CUIJERT)



INRAE

Systemes et ouvrages
de protection
contre les inondations
d'origines maritimes et fluviales

Pour accéder au contenu des articles sur Zenodo :

<https://zenodo.org/communities/diques2024>

Version pdf du livret disponible sur Zenodo :

DOI : [10.5281/zenodo.10730479](https://doi.org/10.5281/zenodo.10730479)

Systemes et ouvrages
de protection
contre les inondations
d'origines maritimes et fluviales

4^e colloque – Dignes 2024

27-29 mars 2024

Sous la direction de
Rémy Tourment et Laurent Peyras

Organisateur
INRAE

Partenaires



Partenaires pour la visite d'ouvrages



Avec le soutien de



Table des matières

PREFACE	13
THEME 1. GOUVERNANCE ET ORGANISATION	17
Mise en perspective de l'organisation de la gestion des digues domaniales sur la Loire du XVI ^e siècle à nos jours	19
Digues patrimoniales en territoire Unesco – les levées de Loire	21
Le reclassement des systèmes d'endiguement de Noirmoutier et ses suites	23
La territorialisation de la compétence GEMAPI dans le bassin de l'Adour. Le cas de deux EPCI-FP du PAPI de l'agglomération dacquoise	25
Études de dangers de systèmes d'endiguement : une mise en lumière des questions posées à l'appui technique au contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques	27
Un projet d'aménagement d'intérêt commun pour les ouvrages de protection contre les inondations du bassin de la Loire et ses affluents	29
Développement d'une approche BIM (Building Information Modeling) pour l'amélioration de la sécurité des digues de protection contre les inondations et couplage avec le SIRS Digues	31
Une méthode d'intégration environnementale des projets de protection contre les inondations	33
Traitement des essences végétales envahissantes sur les ouvrages hydrauliques	35
SIRS Digues : un outil de gestion des ouvrages de protection contre les inondations, façonnable, efficace et en constante évolution	37
Cartographie numérique interactive du risque d'inondation du Rhône - de l'étude de dangers au développement de la culture du risque	39
Surveillance et intervention d'urgence en période de crue : sécurisation du dispositif et fonctionnement en mode dégradé	41
Impacts directs et indirects de la tempête Alex sur la surveillance des crues et la gestion des digues sur le territoire maralpin	43
De la gestion en crue vers la gestion de crise : un groupe de travail pour accompagner les gestionnaires de digues	45
Mise en perspective de la situation des digues en France par comparaison avec les ouvrages de protection contre les inondations d'autres pays dans le monde	47
THEME 2. OUVRAGES ET SYSTEMES DE PROTECTION ET STRATEGIES DE GESTION DES RISQUES INONDATIONS	49
Déploiement d'une stratégie sur le littoral de Camargue : diagnostic de territoire et réponses possibles	51
Définition et études de dangers des systèmes d'endiguement de la Métropole du Grand Paris	53
L'aménagement hydraulique de la Bassée : un maillon essentiel de la prévention des crues en amont de l'Île-de-France	55

Aménagement hydraulique de la Savoureuse, singulier par sa gestion et son fonctionnement	57
Digues résistantes à la surverse dans les zones d'inondation contrôlées dans le bassin versant de l'Escaut maritime en Flandre (Belgique), et perspectives pour la France	59
Retour d'expérience de la gestion de la crue de février 2021 en Loire aval	61
La sécurisation et le renforcement des digues du Rhône, l'optimisation d'un projet à contraintes multiples	63
Quel niveau de performance pour un barrage multifonction, point d'entrée du système de protection aval contre les inondations ?	65
Optimisation du système de protection du collège de Saint-Sauveur-sur-Tinée	67
L'Isère à l'amont de Grenoble : modalités de gestion du transport solide pour assurer sur le long terme le maintien du niveau de protection des zones protégées	69
Travaux de reprise du système d'endiguement de Mindin à Saint-Brévin-Les-Pins à l'embouchure de la Loire	71
Retour d'expérience de 12 années de travaux d'entretiens sur les digues de l'Agly maritime	73
Retour d'expérience des études préalables aux procédures de désaffectation, déclassement et neutralisation de la digue de l'Agouille de la Division dans la Plaine de la Salanque : cas d'ouvrage assimilable à des digues de second rang	75
Stratégie de classement des systèmes d'endiguement sur le territoire de Arche Agglo	77
Aménagements contre les inondations et restauration morphologique à Hauterives (France, 26)	79
Cadereaux de Nîmes : Utilisation de la méthode tunnelière dans la lutte contre les inondations	81

THEME 3. CONNAISSANCE ET MODELISATION DES ALEAS NATURELS 83

Définition du niveau de protection en milieu maritime complexe - Le système d'endiguement de Saint-Malo	85
Méthodologie de calcul de la hauteur des vagues dues au vent et du run-up associé sur des grands linéaires d'endigements	87
Aide à la conception des systèmes de protection contre les crues des Rios La Leche et Motupe (Lambayeque, Pérou)	89
Étude de dangers de la digue de la Rivière-des-pluies (Réunion) : méthodologie simplifiée de prise en compte des évolutions morphologiques du lit pour caractériser les sollicitations hydrauliques	91
Exploitation contemporaine du retour d'expérience conduit par l'architecte Mathieu à la suite des crues de 1707 et 1709 sur la Loire	93
Instrumentation de la digue de La Riche : première étape vers un observatoire des interactions sols-climat	95
Étude hydraulique de la Retrève : Modélisation hydraulique et propositions d'aménagement	97
Le caractère significatif des étiages pour la stabilité des ouvrages composant les systèmes d'endiguement fluvio-maritimes de la Seine en aval de Rouen	99

**THEME 4. CONNAISSANCE, Y COMPRIS RETOUR D'EXPERIENCE,
ET MODELISATION DES MODES DE RUPTURE, DES MECANISMES
ET SCENARIOS DE DEFAILLANCE DES OUVRAGES ET DES SYSTEMES** 101

Les ruptures des digues de protection : mécanismes et approche par scénarios	103
Méthodologie d'évaluation du risque d'érosion interne des barrages latéraux du Rhône	105
Étude de la sensibilité à l'érosion interne du système d'endiguement du val d'Authion via les essais HET	107
Étude paramétrique de l'érosion de surface d'un sol à l'aide des dispositifs HET et EFA	109
Analyse des ruptures des levées de Loire lors des crues de la fin du XIX ^e siècle	111
Relation entre paléo-chenaux et processus d'érosion interne dans les sols de fondation des digues de protection	113
Approche pour estimer la probabilité que l'érosion interne initie une brèche à travers une digue, appliquée aux digues à faciès hétérogènes sur des linéaires importants	115
Proposition d'une démarche pour évaluer le risque d'érosion interne d'une digue fluviale : Étude paramétrique hydraulique	117
Les essais d'érosion interne et externe en géotechnique	119
Risque d'érosion externe des digues maritimes en remblai : principaux résultats du projet Polder2C's, essais grandeur nature, campagnes de reconnaissances et modélisations numériques	121
Évaluation de l'érodabilité de la rehausse fusible d'un déversoir de la Loire moyenne par essais d'érosion à jets mobiles	123
Résistance à la surverse - Essais in situ	125
Retour d'expérience sur l'instrumentation des levées de Loire	127
Évaluation des protections en enrochements : inspection visuelle et diagnostic	129
Confortement des protections anti-crues à l'aide de palplanches en acier	131
Défaillances structurelles de digues torrentielles : retour d'expérience et perspectives de synthèse sur l'accidentologie	133
Modélisation numérique de la suffusion basée sur les données expérimentales	135
Nouveau dispositif pour l'étude de la suffusion suivants différents états mécaniques	137
Le projet Overcome : comprendre et modéliser les processus d'érosion par surverse des digues et barrages en remblai constitués de matériaux grossiers à granulométries étalées	139
Comportement hydromécanique à long terme d'un sol traité prélevé dans un remblai	141
Évolution des performances de digues traitées à la chaux en climat méditerranéen	143

**THEME 5. RECONNAISSANCES, SURVEILLANCE, AUSCULTATION,
DIAGNOSTIC, DES DIGUES, AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES
ET OUVRAGES ASSOCIES (AIDE A LA DECISION 1 - OUVRAGES)** 145

Études de dangers des systèmes d'endiguement – Vers un outil modulaire CAROHL de Calcul de l'Aléa Rupture des Ouvrages Hydrauliques Linéaires	147
Proposition d'une méthode pour évaluer les probabilités de défaillance des digues fluviales basée sur l'élicitation, l'agrégation et la réduction des biais du jugement d'expert (leCAD)	149

Fusion de données géophysiques (TRE et MASW) et géotechniques (granulométrie) pour la caractérisation de digues en terre	151
La plateforme de recherche DIGUE 2020 : un laboratoire de recherche in situ pour la conception de digues maritimes, l'étude des actions de la mer sur les digues et la durabilité	153
Désordres chroniques de berges et digues de protection, retour d'expérience sur les ouvrages de la Métropole de Bordeaux en bordure de Garonne et Dordogne	155
Démarche de qualification de l'utilisation de la méthode MASW sur les digues par mesures en environnement contrôlé et simulations pour évaluer l'influence de la géométrie 3D des ouvrages	157
Un pénétromètre à pointe contrôlé en force ou en déplacement pour une caractérisation étendue des sols	159
SEABIM®, le jumeau numérique appliqué à la gestion patrimoniale de digues maritimes à talus	161
Polarisation provoquée - une méthode non-intrusive pour caractériser les écoulements dans les digues : Application à la rivière de l'Agly	163
Évaluation de la performance de digues comportant des infrastructures : méthode basée sur la formalisation des connaissances	165
Gestion des risques de réalisation de la passerelle Rapas à Toulouse sur la digue de protection des crues de la Garonne	167
Évaluation des performances d'un limon traité chaux-liants sous sollicitations mécaniques cycliques pour une digue de canal	169
Comment s'assurer de la durabilité d'un ouvrage en terre quand on est maître d'ouvrage ?	171
Étude de la réalisation de dispositif d'étanchéité complet par traitement in situ des matériaux : performances et retour d'expérience	173
Caractère monolithique des remblais en Limons traités : Optimisation des modes de compactage, de collage des couches et des performances mécaniques	175
Comportement des limons traités à la chaux et au liant hydraulique immergés pendant leur cure	177

THEME 6. ANALYSES DE RISQUE, ANALYSES COÛTS BÉNÉFICES, ANALYSES MULTICRITÈRES (AIDE À LA DÉCISION 2 - SYSTÈMES) 179

Analyse multicritère pour la sélection des ouvrages constitutifs des systèmes d'endiguement	181
Analyse des ouvrages de protection sur le bassin du Vistre et démarches d'aide à la décision pour statuer sur leur devenir et assurer leur régularisation administrative : 3 cas de figure à Caissargues, Vauvert et Saint-Laurent-d'Aigouze	183
Les endiguements de l'Ariège, entre torrents et rivière de plaine : quelle définition de la protection apportée par les aménagements historiques ?	185
Analyse multicritères (AMC) inondation dans le grand delta du Rhône : mise en place d'une méthode probabiliste d'évaluation des enjeux impactés et des dommages	187
Fonctionnement hydraulique du système d'endiguement du val d'Orléans, conception et réalisation des travaux de gestion de la surverse des digues (Loiret)	189

Évaluation probabiliste de la fiabilité des digues prenant en compte les mécanismes de glissement, d'érosion interne et de surverse : application à une étude de cas au Canada	191
Étude sur le devenir du système d'endiguement de Saint-Pierre-du-Vauvray (27)	193

THEME 7. CONFORTEMENT ET TRAVAUX SUR LES OUVRAGES ET SYSTEMES 195

Barrages en Sol Cimenté : présentation du nouveau Bulletin 195 de la CIGB	197
Conception structurelle des digues de protection contre les inondations de la Motupe et de La Leche (Lambayeque, Pérou)	199
Conception et réalisation de l'aménagement hydraulique de la Turdine	201
Conception et réalisation de la digue rétro-littorale du bois de Sapins à la frontière entre le fluvial et le maritime	203
Écrans d'étanchéité dans les levées de la Loire : retour d'expérience sur 10 ans de « deep soil mixing »	205
Ouvrages écrêteurs de crue protégeant les villes de Fréjus et Saint-Raphaël : construction des barrages d'Aspé et de Vaulongue	207
REX du chantier de renforcement de la levée de Tours Loire Aval à La Riche, par épaissement côté val et filtre granulaire	209
Rivière des galets sur l'île de la Réunion – Retour d'expérience après passages de cyclones sur les confortements par blocs artificiels attachés	211
Principes et techniques de confortement et de réparation des digues	213
Guidage GPS appliqué à la méthode « Q/S » pour le contrôle du compactage	215
Retour d'expérience des travaux de digues du site pilote de La Bassée	217
Réalisation des travaux de confortement sur le système d'endiguement de la Fosse aux Carpes (classe C) situé en rive droite de la Seine à Draveil (91)	219
Retour d'expérience des travaux de sécurisation du barrage du Ruchol et construction du barrage des Arques	221
Conception et réalisation de la protection périphérique contre les risques d'inondations externes pour le CNPE du Blayais	223
Les digues de la presqu'île d'Ambès, une réhabilitation dans un contexte fortement évolutif	225
Digue Maritime d'Yves	227

INDEX DES AUTEURS 229

Préface

Il y a environ trente ans, la communauté française a redécouvert l'existence et l'importance de son patrimoine de digues de protection contre les inondations, fluviales, maritimes et torrentielles, à l'occasion de crues sur le Rhône aval ayant endommagé les digues de Camargue et inondé son delta. Depuis, les épisodes se sont multipliés dans des contextes géographiques divers, et parfois de manière répétée sur certains secteurs : Rhône aval en octobre 1993, janvier 1994, décembre 2003, Gard et Rhône septembre 2002, Aude 1999, Agly 1999, 2013, 2014 et 2020, tempête Xynthia 2010, crues torrentielles de juin 2013 dans les Pyrénées, pour ne citer que les plus importants en termes de conséquences humaines ou matérielles. Ces événements récents sont survenus après plus d'un siècle de « tranquillité », les derniers événements majeurs de crue mettant en jeu des digues datant du XIXe siècle, même si d'autres événements ont pu amener à des prises de conscience du patrimoine de digues et à des actions de reprise en main plus locales, comme sur la Loire dans les années 1960 ou dans le Centre-ouest du pays suite aux crues de 1982-83.

Suite à ces différents événements parfois très récents, un constat a été fait de l'importance du patrimoine (recensement national lancé en 1999) des besoins en corpus scientifique et technique et d'organisation de la gouvernance (réglementation technique et organisation de la gestion des ouvrages à travers la compétence GEMAPI). Des évolutions conséquentes ont eu lieu dans tous ces domaines, entre autres la communauté scientifique et technique a produit de nombreuses avancées marquantes dans les connaissances et les pratiques. L'objectif de toutes ces actions étant une meilleure sûreté et efficacité de ces ouvrages et systèmes de protection.

Le colloque Dignes 2024, qui se tient après quelques années d'exercice de la compétence GEMAPI, est le quatrième colloque national sur ce sujet, après 2004 à Orléans et 2013 et 2019 à Aix en Provence. Pour l'édition 2024, le colloque intègre explicitement et pour la première fois les ouvrages de stockage provisoire des eaux de crues (barrages écrêteurs et autres bassins de stockage, éventuellement organisés en systèmes complexes).

Comme les éditions précédentes, il a pour objet de partager les connaissances et les bonnes pratiques. C'est une vitrine de la communauté œuvrant sur les digues au niveau français, avec une ouverture à l'international, qui regroupe tous les professionnels concernés par le domaine : personnels des sociétés d'ingénierie, chercheurs et universitaires, élus et techniciens des organisations en charge de la gestion et de l'exploitation des systèmes de protection, entreprises de travaux, prestataires de services, services de l'État en charge du contrôle des ouvrages ou de la gestion des risques. Cette communauté plurielle réunie dans un même événement fait une richesse de ces journées.

Le colloque Dignes 2024 a été organisé par INRAE. Il bénéficie des partenariats du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR), de l'association France Dignes et du Cerema, ainsi que du SYMADREM et du SMAVD pour les visites techniques. Le colloque bénéficie également du soutien du Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT).

Le colloque permet d'établir un état des lieux en particulier sur :

- l'organisation des gestionnaires et des autorités compétentes,
- le retour d'expérience sur des événements récents,
- les projets de confortement ou de construction d'ouvrages, récents ou en cours de conception ou de réalisation,
- les résultats et avancées en matière d'analyse, d'évaluation et de gestion des risques, de la vulnérabilité et de la résilience des territoires et leur application dans les études de dangers des systèmes d'endiguement et des aménagements hydrauliques de stockage provisoire des eaux,

- les résultats et avancées techniques, technologiques et scientifiques dans les différents domaines géomécanique, génie civil et hydraulique, en lien avec les systèmes et ouvrages de protection fluviaux, torrentiels et maritimes, incluant les résultats et avancées des nombreux projets de recherche récents ou en cours dans le domaine.

Les communications ont été regroupées en sept thèmes faisant l'objet de sessions individualisées pendant le colloque et de chapitres séparés dans le recueil des résumés. Le Comité Scientifique a travaillé en sous-groupes pour la sélection, les relectures et la mise au point du programme, chacun étant chargé d'un thème particulier parmi :

- Gouvernance et organisation
- Ouvrages et systèmes de protection et stratégies de gestion des risques inondations
- Connaissance et modélisation des aléas naturels
- Connaissance, y compris retour d'expérience, et modélisation des modes de rupture, des mécanismes et scénarios de défaillance des ouvrages et des systèmes
- Reconnaissances, surveillance, auscultation, diagnostic, des digues, aménagements hydrauliques et ouvrages associés (aide à la décision 1 - ouvrages)
- Analyses de risque, Analyses Coûts Bénéfices, Analyses MultiCritères (aide à la décision 2 - systèmes)
- Confortement et travaux sur les ouvrages et systèmes

99 articles ont été retenus au total pour publication et présentation au colloque sous forme de présentation orale ou de poster avec ou sans présentation flash en séance. Par ailleurs, 10 articles centrés sur le champ de la géotechnique ont été sélectionnés pour un numéro spécial de la Revue Française de Géotechnique dédié au colloque.

Les progrès réalisés depuis une trentaine d'années sont conséquents mais ils méritent d'être poursuivis. La communauté des digues et ouvrages de protection contre les inondations a désormais une existence bien établie. À l'échelle nationale, la prise en main depuis le début des années 2000 du sujet des digues par le CFBR, qui regroupe tous les types professionnels concernés par le sujet, et la création de l'association France Digues en 2013, qui regroupe les structures gestionnaires, assurent un cadre d'échange permanent. À l'échelle internationale, le Club Européen de la CIGB (EurCOLD) abrite un groupe de travail "Digues et ouvrages de protection contre les inondations" et la CIGB (ICOLD) un Comité Technique sur les digues. De nombreux projets de recherche nationaux ou internationaux concernent ces ouvrages particuliers. Gageons que la dynamique qui s'est créée se poursuivra, et espérons qu'elle ne s'essoufflera jamais ; l'histoire a montré que de nombreuses années ou décennies sans crue majeure peuvent faire oublier le risque, et des digues oubliées ne sont plus des digues fiables.

Rémy Tourment – Président du Comité Scientifique du colloque Digues 2024
Laurent Peyras – Président du Comité d'Organisation du colloque Digues 2024

Comités

Comité d'organisation

Président

Laurent Peyras INRAE

Membres

Dominique Breil INRAE

Perrine Broust France Dignes

Xavier Caron PoNSH – MTECT

Anne Clutier CFBR

Yann Deniaud Cerema

Amélie Maurin Dumouchel CFBR

Julia Schroeder MCO

Rémy Tourment INRAE

Comité Scientifique

Président

Rémy Tourment INRAE

Membres

Fabien Anselmet École Centrale Marseille

Florent Bacchus PoNSOH

Bruno Beullac INRAE

Yasmina Boussafir Université Gustave Eiffel

Pierre Breul Université Clermont Auvergne

Florent Charles SM3A

Franck Compagnon SMIAGE

Vincent Cormier WSP

Jean-Robert Courivaud EDF CIH

David Criado Cerema

Gérard Degoutte CTPBOH

Christophe Delaunay SCP

Thibaut de Ruffray Eurométropole de Strasbourg

Yann Eglin Métropole du Grand Paris /
Syndicat intercommunal
d'aménagement du Chablais

Muriel Gasc Cerema / Revue Française de Géotechnique

Romain Granjon CNR

Bertrand Jacopin	SMAVD
Damien Kuss	SYMBHI
Frédéric Leseur	DREAL Pays de la Loire
Thibaut Mallet	Symadrem
Thierry Monier	Expert individuel
Mathieu Normand	EGIS
Sérgio Palma-Lopes	Université Gustave Eiffel
Sébastien Patouillard	DREAL Centre Val de Loire
Laurent Peyras	INRAE
Michel Pinhas	Expert individuel
Yann Quefféléan	ONF-RTM
Oualid Rahmani	CC l'île de Noirmoutier
Laetitia Rivollet	PoNSOH
Nathalie Rosin-Corre	Tractebel
Akim Salmi	ISL
Lucile Saussaye	Cerema, ENDSUM
Anton Schleiss	EPFL
Robert Slomp	Rijkswaterstaat
Patrick Soulat	Suez
Eric Vuillermet	BRLi
Marc Vuillet	EIVP

Thème 1

Gouvernance et organisation

Comité scientifique

Animateurs des relectures et de la session orale

Frédéric Leseur
Laetitia Rivollet

DREAL Pays de la Loire
PoNSOH

Relecteurs

Florent Charles
Bertrand Jacopin
Oualid Rahmani

SM3A
SMAVD
CC l'Île de Noirmoutier

Mise en perspective de l'organisation de la gestion des digues
domaniales sur la Loire du XVI^e siècle à nos jours
*Putting into perspective the management of state-owned Loire River's
levees from the 16th century to the present day*

S. Patouillard¹, Y. Pepe¹, V. Grand¹, J. Maurin¹

¹ DREAL Centre – Val de Loire (DETL), Orléans, France,
sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

Résumé

La loi de Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d’Affirmation des Métropoles (MAPTAM) du 27 janvier 2014 conduit à une véritable remise à plat de la gestion des digues de protection contre les inondations et submersion. Elle refonde l’organisation de leur gestion sur la base d’une compétence exclusive et obligatoire attribuée aux regroupements de villes et de communes. Cette nouvelle organisation a notamment pour objet l’amélioration de la sécurité des personnes en garantissant la gestion des ouvrages (suppression des digues orphelines) et le rapprochement de cette compétence avec celle de l’aménagement du territoire. Sur la Loire, les systèmes de protection sont anciens et majoritairement constitués de digues domaniales. Cette longue histoire a conduit les services de l’État à assurer la mission de gestion sur un patrimoine de près de 530 km de levées. Jusqu’en janvier 2024, ce sont les services territoriaux des préfectures de département (DDT) du bassin de la Loire qui portent cette mission et qui accompagnent les collectivités au transfert de gestion. Mais l’organisation n’a pas toujours été celle-ci. Au XVI^e siècle, à la veille de la création d’un service dédié à l’entretien et aux réparations des digues (service des turcies et levées), les maires et échevins des principales villes jalonnant la Loire avaient déjà un rôle déterminant sur la gestion de ces ouvrages. L’objet de l’article est de dresser un panorama des différentes organisations qui ont eu à porter la responsabilité des levées de Loire du XVI^e siècle à nos jours : le rôle partagé entre le pouvoir royal et les grandes villes ligériennes à la fin du XVI^e siècle, le renforcement du pouvoir royal avec le service des turcies et levées des XVII^e et XVIII^e siècle (cf. Illustration), la continuité des missions entre la révolution et le premier empire en lien avec la navigation, le service spécial de la Loire au XIX^e siècle et la reprise par les services déconcentrés de l’État au XX^e siècle. L’article propose une mise en perspective des évolutions de ces organisations en fonction de l’évolution des enjeux et, plus largement, interroge sur la continuité du service public rendu aux populations vivant derrière ces digues de protection pendant cette période de cinq siècles.

Mots-clés

levées, digues, organisation, histoire, Loire

Abstract

In 2014, a new law regarding the Territorial Public Action Modernisation led to a complete change on management of the levees used to protect against flooding and submersion: this management will be exclusively and compulsorily assigned to groups of towns and municipalities with their own tax status. The main aims of this new organisation are to improve personal safety by guaranteeing the management of structures (removal of orphan levees) and to bring this responsibility into line with the one of town and country planning. The protection systems on the Loire river are old and mainly consisting of state-owned levees. This long history has led the State to take on the task of managing almost 530 km of levees. Until January 2024, the territorial services of the departmental prefectures (*DDT*) in the Loire river catchment is in charge of this task, and assist local authorities with the transfer of management. But the organisation used to be very different. In the 16th century, just before the creation of a department dedicated to the maintenance and repair of levees (*département des turcies et levées*), the mayors and aldermen of the main towns along the Loire already had a decisive role in the management of these structures. The aim of this article is to provide an overview of the various organisations that have been responsible for the levees on the Loire from the 16th century to nowadays: the role shared between the royal authorities and the major towns on the Loire at the end of the 16th century, the strengthening of royal authority with the turcies and levees service in the 17th and 18th centuries (see Illustration), the continuity of the missions between the Revolution and the First Empire in connection with navigation, the special Loire service in the 19th century and the takeover by the decentralised government departments in the 20th century. Illustration), the continuity of missions between the Revolution and the First Empire in relation to navigation, the special Loire service in the 19th century and the takeover by decentralised government departments in the 20th century. The article puts into perspective changes in these organisations as a function of the issues changes and, more broadly, demonstrates the continuity of the public services provided to people living behind these protective levees over a period of almost five centuries.

Key Words

levees, dykes, organisation, history, Loire river



Atlas produit par le Département des Turcies et Levées en 1755 (extrait).

Atlas produced by the Turcies and Levees Department in 1755 (extract).

Digues patrimoniales en territoire Unesco – les levées de Loire *Heritage dykes in Unesco territory – the levees of the Loire river*

V. Serna¹, B. Marmiroli², G. Mezières³

¹ Ministère de la Culture, Paris, France, Virginie.serna@culture.gouv.fr

² Mission Val de Loire, Tours, France, marmiroli@missionvaldeloire.fr

³ Journaliste scientifique indépendant, Douarnenez, France,
mezquillaume@hotmail.fr

Résumé

Depuis 2000, le Val de Loire est inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco. Cette reconnaissance internationale consacre la qualité des paysages culturels d'un linéaire de Loire moyenne compris entre Sully-sur-Loire et Chalonnes-sur-Loire. À l'intérieur de ce périmètre, les levées forment un réseau de digues long de 710 kilomètres le long de la Loire et de ses affluents. Elles sont tout à la fois un axe de communication, un « balcon » sur le Val, un « corset » pour le fleuve et une démarcation entre le lit mineur du fleuve et le lit majeur, occupé par les infrastructures urbaines et agricoles. En 2024, les collectivités du Val de Loire recevront de l'État la charge de gestion et d'entretien de ce système technique dont les fondations datent de la période médiévale. Elles hériteront de décisions prises par les contemporains de Henri II, Louis XI ou Louis XIV et de différents choix d'aménagement qui ont produit le Val de Loire tel que nous le vivons. Les levées sont les témoins de cette histoire longue des relations des sociétés au fleuve. Initialement destinées à limiter la submersion des terres agricoles puis à faciliter la navigation, elles protègent aujourd'hui un territoire largement urbanisé, peuplé de près d'un million d'habitants.

L'article propose de montrer comment la Mission Val de Loire — syndicat mixte interrégional qui développe des actions en faveur de la connaissance des paysages et des patrimoines du Val de Loire Unesco — et son conseil scientifique se sont saisis de ce système technique historique au sein de leur mission. Au travers du plan de gestion, du périmètre du territoire Unesco, de l'animation des réseaux des collectivités territoriales, des acteurs et riverains, comment interroger les levées ? L'article fera partager les différentes expériences menées en 2022 (podcast, réflexion du conseil scientifique, accompagnement des communes, lien avec l'Établissement public Loire, Lecture du paysage ...). Seront interrogés également les différents types et procédures de protection mises en œuvre au sein du ministère de la culture pour une meilleure prise en compte patrimoniale de ces paysages du fleuve.

Mots-clés

patrimoine mondial, paysage, digue, Loire, archéologie des rivières

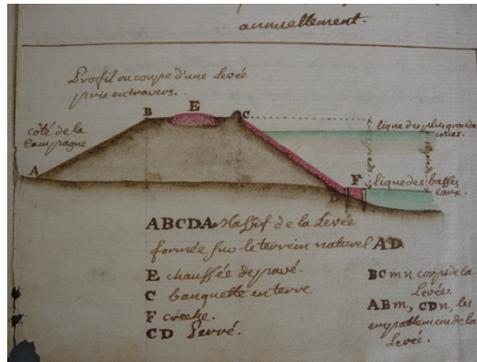
Abstract

Since 2000, the Val de Loire has been listed as a UNESCO World Heritage Site. This international recognition acknowledges the quality of the cultural landscapes along a stretch of the middle Loire between Sully-sur-Loire and Chalonnes-sur-Loire. Within this perimeter, the levees form a 710-kilometer-long network of dykes along the Loire river and its tributaries. They are at once a communication axis, a "balcony" over the Val, a "corset" for the river and a demarcation between the river's minor bed and the major bed, occupied by urban and agricultural infrastructures. In 2024, the communities of the Val de Loire will receive from the State the responsibility of managing and maintaining this technical system, the foundations of which date back to medieval times. They will inherit the decisions taken by the contemporaries of Henri II, Louis XI and Louis XIV, and the various development choices that have produced the Val de Loire as we know it today. Levees bear witness to the long history of society's relationship with the river. Initially designed to limit the flooding of farmland, then to facilitate navigation, they now protect a largely urbanized territory, home to almost a million people.

This article will show how the Val de Loire Mission - an inter-regional syndicate promoting knowledge of the landscapes and heritage of the Val de Loire Unesco area - and its scientific council have taken up this historic technical system as part of their mission. Through the management plan, the UNESCO territory's perimeter, the networks of local authorities, stakeholders and local residents, how can we question the levees? The article will share the various experiments carried out in 2022 (podcast, scientific council discussions, support for local authorities, links with the Etablissement public Loire, landscape reading, etc.). It will also examine the various types of protection procedures implemented by the Ministry of Culture to ensure that these river landscapes are given greater consideration in terms of heritage.

Key Words

world Heritage, landscape, dyke, Loire, river archaeology



Profil ou coupe d'une levée pris en travers, 1786. ADIL, C 271 (cl. V. Serna).

Profile or section of a levee taken across, 1786. ADIL, C 271 (cl. V. Serna).

**Le reclassement des systèmes d'endiguement
de Noirmoutier et ses suites**
*The regrading of Noirmoutier's flood protection system
and the subsequent steps*

O. Rahmani¹, J-V. Delemasure², F. Leseur³, M. Paillart¹, T. Lucari³

¹ Communauté de communes de l'Île de Noirmoutier, Pôle Environnement territorial, Noirmoutier en l'Île, France, resp.littoral@iledenoirmoutier.org

² Cabinet CEREG, Nantes, France, jv.delemasure@cereq.com

³Risques naturels et technologiques, DREAL Pays de la Loire, Nantes, France, frederic.leseur@developpement-durable.gouv.fr

Résumé

Du fait de la loi MAPTAM et du décret de 2015, la Communauté de communes de l'Île de Noirmoutier (CCIN) s'est engagée dans les études de reclassement des digues en systèmes d'endiguement. Cela a nécessité une fusion et une mise à jour complète des études de dangers, en lien avec l'arrêté de 2017. La CCIN a été accompagnée par la DREAL Pays de la Loire, qui a fourni des éléments de cadrage de la consultation des bureaux d'études au dépôt des deux systèmes d'endiguement : Cœur de l'Île (A) et Sableaux-Jacobsen (B). L'étude a été confiée à EGIS Eau et CASAGEC. Elle comprenait une reprise complète et une analyse des données existantes, un diagnostic approfondi, une analyse des données hydrométéorologiques, une proposition de zones protégées, de systèmes de protection et de niveaux de sûreté (à partir duquel la CCIN a déterminé ses niveaux de protection).

Les bureaux d'études ont fait face à quelques difficultés, nécessitant des propositions sur divers aspects tels que le choix du marégraphe de référence, la méthode d'analyse des données pour le diagnostic approfondi, la prise en considération des ouvrages traversants, l'utilisation de données météo-marines, l'intégration des éléments naturels tels que les cordons dunaires et les estrans dynamiques, ainsi que la sélection des scénarios de défaillance. La majorité de ces difficultés ne sont pas abordées en détail dans cet article. Cependant, il est essentiel d'en référer pour rappeler aux lecteurs qu'un dialogue fructueux entre les divers acteurs a permis de résoudre ces points d'incertitude. Ces discussions ont abouti à des décisions étayées en vue de soumettre les demandes requises avant la date limite du 30 juin 2021. Ces paramètres ont été ensuite incorporés par la CCIN, qui a élaboré un protocole et un outil cartographique spécialement conçus pour surveiller les ouvrages, complétant ainsi les pratiques de surveillance déjà en place le long de son littoral

La publication commence par rappeler le cadre réglementaire et local de l'opération ; elle décrit le dérouler de l'étude de dangers ; elle traite de l'accompagnement-cadrage apporté par les services de l'État ; elle décrit la façon dont la CCIN s'est appropriée les connaissances produites pour organiser la gestion et le suivi des ouvrages en toutes circonstances. Chaque item comprend des retours d'expérience et sera présenté comme un exemple de « mise en pratique » des attendus des études de dangers des systèmes d'endiguement.

Mots-clés

système endiguement, classement, étude de dangers, gestionnaire

Abstract

With the MAPTAM law and the 2015 decree, the Community of Communes of Île de Noirmoutier (CCIN) has engaged in the reclassification studies of the seawalls into flood protection systems. This required a complete merger and update of its hazard studies, in connection with the 2017 order. It was accompanied by the DREAL Pays de la Loire, which provided framing elements for the consultation of engineering offices, from the submission of the two systems: Cœur de l'île (A) and Sableaux-Jacobsen (B). The study was entrusted to EGIS Eau and CASAGEC. It included a complete review and analysis of existing data, an in-depth diagnosis, an analysis of hydrometeorological data, a proposal for protected areas, protection systems, and safety levels (from which the CCIN determined its protection levels).

The engineering offices faced difficulties. They had to make proposals: choice of the reference tide gauge, method of data analysis for the in-depth diagnosis, consideration of crossing structures, use of modeled weather and marine forcings, consideration of natural elements (dune and moving forshore), choice of failure scenarios... The discussions led to reasoned choices that allowed the submission of the request before June 30, 2021. The CCIN also dealt with the availability of structures that it did not own. It chose to initiate a procedure for establishing a MAPTAM servitude, which has now been completed. All these elements have been integrated by the CCIN, which has developed a protocol and a cartographic tool adapted to the monitoring of the structures, in addition to the monitoring it already carried out along its entire coastline.

The publication will begin by recalling the regulatory and local framework of the operation; it will describe the procedure for the hazard study, pointing out the difficulties and the solutions provided; it will deal with the accompaniment-framing provided by the services of the State; it will describe how the CCIN has appropriated the knowledge produced to organize the management and monitoring of the works in all circumstances. Each item will include feedback and will be presented as an example of "practicing" the expectations of containment system hazard studies. The publication will conclude on the dynamic and continuous aspect, in particular in anticipation of the scheduled works.

The publication will conclude with the dynamic and ongoing aspect, particularly in anticipation of planned works.

Key Words

flood, protection, grading, danger, study, manager

La territorialisation de la compétence GEMAPI dans le bassin de l'Adour
Le cas de deux EPCI-FP du PAPI de l'agglomération dacquoise
The territorialization of GEMAPI competence in the Adour watershed
The case of two local authorities in south-west of France

L. Matias¹, S. Clarimont², A. Darthos¹, I. Degremont²

¹ Institution Adour / UPPA, Mont-de-Marsan / Pau, France,

lauren.matias@institution-adour.fr ; aurelie.darthos@institution-adour.fr

² Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), UMR 6130 TREE, France,

sylvie.clarimont@univ-pau.fr ; isabelle.degremont@univ-pau.fr

Résumé

Depuis 2018, les établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI-FP) sont en charge de la compétence GEMAPI, créée par les lois MAPTAM (2014) et NOTRe (2015) pour rationaliser et clarifier la répartition des compétences territoriales relatives à la gestion des milieux aquatiques (GEMA) et à la prévention des inondations (PI), afin de mener une politique nationale cohérente sur ce sujet et de répondre aux objectifs des Directives européennes afférentes (2000 et 2007). Cependant, la mise en œuvre de cette compétence modifie non seulement l'organisation territoriale préexistante, mais affecte également la gouvernance locale de l'eau. Ce travail, qui s'inscrit dans le cadre d'une thèse CIFRE, vise donc à étudier ces bouleversements territoriaux et à identifier les leviers et les verrous à la prise en main effective de la GEMAPI, dans tout le bassin de l'Adour, en tenant compte des enjeux de gouvernance ainsi que des enjeux techniques et financiers, notamment pour des intercommunalités aux moyens modestes.

Compte tenu de l'étendue du bassin-versant (17 000 km²) et de sa grande diversité tant morphologique que dans les modes d'occupation du sol, la communication se centre sur l'analyse de deux territoires contrastés, mais contigus : la Communauté d'agglomération du Grand Dax (CAGD) et la Communauté de communes Terres de Chalosse (CCTC). Dans ces deux EPCI-FP inégalement peuplés et dynamiques, mais tous deux exposés au risque d'inondation, il s'agira de montrer quelles ont été les modalités concrètes de territorialisation de la compétence (le terme de « territorialisation » étant entendu ici au sens premier de processus de transfert de pouvoir de l'État vers un échelon inférieur) en mobilisant aussi bien l'observation directe que l'analyse de données secondaires (études, rapports, documents opérationnels) et celle de données primaires, inexistantes jusqu'alors, construites à partir d'enquêtes par questionnaires et entretiens.

Les premiers résultats font ressortir la prise en charge très différenciée de la compétence GEMAPI dans les deux EPCI-FP avec une superposition complexe de périmètres d'intervention en dépit de la simplification et de la rationalisation des périmètres intercommunaux consécutives à la loi NOTRe, de même qu'une prévalence des enjeux liés au volet PI par rapport à ceux liés à la GEMA, nettement en retrait dans les entretiens menés auprès des acteurs locaux. Dans ces deux EPCI-FP particulièrement vulnérables au risque d'inondation avec des crues fréquentes et d'intensité variable dont certaines crues majeures (comme la crue de référence de février 1952 ou les crues de décembre 1981 et janvier 2014), la prévention des inondations apparaît ainsi prioritaire avec une focalisation de l'attention sur la gestion des digues. Si les systèmes d'endiguement sont tout aussi complexes dans l'EPCI-FP rural que dans la CAGD avec des ouvrages souvent hétéroclites et aux origines mal déterminées, les moyens

mobilisables pour leur entretien ou leur restauration sont fort différents du fait de capacités financières et humaines inégales. Par conséquent, alors que la CAGD a pu s'engager en faveur du maintien de son système d'endiguement jugé stratégique dans le dispositif de protection des biens et des personnes face à l'inondation, la CCTC n'a pas encore opéré de choix.

Mots-clés

Adour, GEMAPI, territorialisation, inondations, digues

Abstract

Since 2018, french national laws (MAPTAM, 2014; NOTRe, 2015) have given local authorities jurisdiction over aquatic environment management (GEMA) and flood prevention (PI). The aim was to rationalize and clarify the distribution of competences in order to conduct a coherent public policy on these subjects and meet the objectives of the corresponding European Directives (2000 and 2007).

However, the implementation of these competences modifies the pre-existing territorial organization and also affects local water governance. The research aims to study these territorial upheavals and identify the levers and issues to the concrete control of these responsibilities throughout the Adour watershed (South-West France). The aim is to understand the technical, financial and governance issues, particularly for public authorities with modest means.

Given the size of the watershed (17,000 km²) and its morphological and land-use diversities, this paper will focus on the analysis of two contrasting but contiguous territories: the Dax metropolitan area (CAGD) and the "Terres de Chalosse" community (CCTC). These two local authorities are unequally populated and dynamic, but both are exposed to flood risks. The aim is to illustrate concrete ways in which competences have been territorialized; "territorialization" is understood here as the process of transferring power from State to a lower level. This research is based on direct observations, analysis of secondary data (studies, reports, operational documents) and productions of primary data (using questionnaires and interviews).

Initial results show that GEMAPI responsibilities vary considerably between the two communities, with a complex overlap of intervention perimeters despite national law's desire to simplify and rationalize. Flood prevention (PI) issues take precedence over those relating to aquatic environment management (GEMA). These were relegated to the background in interviews with local stakeholders. In the two communities, flood prevention appears to be a priority, with a focus on dike management. Diking systems are complex in both communities, with structures often heterogeneous and of unclear origins. The resources that can be mobilized for their maintenance or restoration are very different, due to unequal financial and human capacities. Consequently, while the CAGD has decided to commit to maintaining its diking system, a strategic element in the protection of people and property against flooding, the CCTC has not yet been able to take a similar decision.

Key Words

Adour River, national law GEMAPI, territorialization, floods, dykes

Études de dangers de systèmes d'endiguement : une mise en lumière des questions posées à l'appui technique au contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques

Hazard studies for flood defence systems: highlighting some issues from technical support's point of view

A. Brune¹, P. Ledoux¹

¹ Cerema Méditerranée, Aix-en-Provence, France, anne.brune@cerema.fr

Résumé

L'arrêté ministériel du 7 avril 2017, modifié le 30 septembre 2019, précise le contenu attendu des études de dangers (EDD) des systèmes d'endiguement. Celles-ci doivent notamment apporter une démonstration du niveau de protection assuré par les ouvrages composant ce système, et la garantie dans le temps du maintien de leur performance.

Les systèmes d'endiguements sont soumis à une autorisation délivrée par l'administration. Les services de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques (SCSOH) vérifient la complétude et la conformité des études de dangers et assurent une vérification de la pertinence des éléments contenus dans l'EDD qui constitue une pièce maîtresse du dossier de demande d'autorisation. Il s'agit en premier lieu de s'assurer de l'absence d'erreur manifeste ou de lacunes graves, qui rendraient la démonstration du niveau de performance incohérente au regard des enjeux présentés par le système d'endiguement. Le SCSOH bénéficie d'un appui technique assuré par le Cerema pour les systèmes d'endiguement.

Cet article présente une analyse rétrospective des questions remontées par les services de l'État à l'appui technique du Cerema Méditerranée concernant les EDD de systèmes d'endiguement sur les dernières années.

L'analyse apporte notamment une mise en lumière des thématiques nécessitant le plus souvent des compléments ou demandes d'éclaircissement pour la bonne compréhension de la démonstration apportée. Cette analyse ne préjuge pas de l'avis rendu *in fine* par les SCSOH qui intègre d'autres éléments d'appréciation et de proportionnalité du contrôle aux enjeux.

On constate que certains sujets génèrent systématiquement des interrogations notamment :

- la définition des systèmes d'endiguement dès lors que ceux-ci intègrent des ouvrages de natures, fonctions, ou de propriétés variées ;
- la complétude du diagnostic approfondi dans un contexte de modification des ouvrages ou de reprises d'ouvrages anciens ; et la cohérence avec l'analyse des probabilités de défaillance ;
- la pertinence du lieu de référence choisi pour la définition du niveau de protection.

Cette synthèse vise à éclairer les rédacteurs, relecteurs d'études de dangers, ainsi que les services de contrôle, sur les points qui selon l'appui technique, méritent une attention particulière.

Mots-clés

systèmes d'endiguement, études de dangers, diagnostic, analyse de risques, contrôle de sécurité

Abstract

In 2017 and 2019, French ministry in charge of natural hazards prevention, implemented new regulation on hazard studies for flood levee systems. These documents have to comply with new standards, codifying their content and especially the demonstration of the mechanical resistance of hydraulic structures protecting against floods or submersions.

Levee systems are then subjected to national regulation. In this context, they need to get an authorization from the local government authority. The hazard study is one of the main piece that will allow the manager of the levee system to get an official authorization. To give this authorization, local government department has to check whether hazard studies comply with actual standards and provide consistent arguments about the resistance of levee systems. The first issue is to avoid important mistakes that could fault the demonstration of the mechanical resistance and the ability of the levee system to protect efficiently. To carry on this verification, local government departments in charge of hazard studies instruction, can count on the Cerema (Centre for Studies and Expertise on Risks, the Environment, Mobility and Urban Planning), a French public agency who provides support on technical issues.

This paper aims at giving an analysis of most frequently asked questions to technical support concerning the way to undergo hazard studies of levee systems. It particularly highlights subjects that need to be better described for the consistence of the demonstration. It does not prejudice on the final validation of the study, yet it gives some minimal points to pay attention to.

We can observe that some subjects invariably raise questions:

- the delimitation and composition of levee systems, when they are made up of various types of structures;
- the completeness of the structural diagnosis when it is led on ancient structures, or when consolidation works are undergone; the data coherence with failure probability analysis;
- the choice of reference location, to measure the level of protection of the levee system.

This synthesis can warn people in charge of hazard studies elaboration, or those who are in charge of their verification, about subjects that need to be specifically well justified.

Key Words

flood defence systems, hazard studies, diagnosis, safety check, level of protection

**Un projet d'aménagement d'intérêt commun
pour les ouvrages de protection contre les inondations
du bassin de la Loire et ses affluents**
*A development project of common interest for flood protection
infrastructures in the Loire watershed*

V. Gaspari¹, P. Philippe¹, C. Uguen²

¹ EP Loire, Angers, France, virginie.gaspari@eptb-loire.fr ;
pierre.philippe@eptb-loire.fr

² EP Loire, Tours, France, camille.uguen@eptb-loire.fr

Résumé

Avec un cadre d'intervention en restructuration, pour ce qui concerne à la fois l'organisation territoriale et les politiques publiques de gestion de l'eau et des risques naturels associés, et dans un contexte marqué par de fortes incertitudes, notamment l'appréciation pour le bassin fluvial des impacts des changements climatiques en termes d'inondations comme de sécheresses, l'Établissement public Loire a pris l'initiative en octobre 2015 d'une analyse d'opportunité et de faisabilité d'un projet d'aménagement d'intérêt commun (PAIC) pour les ouvrages de protection contre les inondations à l'échelle du bassin fluvial. Les résultats de cette analyse (2017) ont permis de constater l'opportunité et la faisabilité du projet en termes stratégiques, économiques et de gestion, au-delà de l'acte fondateur de solidarité de bassin fluvial. L'approche retenue intègre les synergies de fonctionnement et de gestion entre infrastructures « dures », de type barrage (notamment Villerest, propriété de l'Établissement) ou digues, et « souples », comme les zones d'expansion de crues, permettant une gestion intégrée des risques d'inondation.

La gestion des systèmes d'endiguement à l'échelle du bassin fluvial par l'Établissement s'ancre dans le prolongement des actions conduites depuis près de 40 ans dans l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, s'appuyant sur sa structure, garante d'un dialogue entre collectivités, et visant à assurer, sur un périmètre de gestion cohérent, une homogénéité de traitement, la mutualisation et l'optimisation des moyens techniques comme financiers.

Concrètement, le but du PAIC est la gestion pérenne et cohérente à une échelle adaptée des systèmes d'endiguement du bassin fluvial. Coconstruit avec les collectivités, il a été approuvé en juillet 2021, et a reçu un avis favorable du comité de bassin Loire-Bretagne en octobre 2021. La délégation de la gestion des systèmes d'endiguement à l'Établissement public Loire permet une mutualisation de moyens humains, techniques et financiers, en renforçant l'opérationnalité et en réduisant les coûts grâce à des économies d'échelles, et la recherche de l'optimisation des financements. En termes opérationnels, ce projet est mis en œuvre depuis l'été 2019 sur la plateforme d'Angers avec la gestion par voie de délégation d'une cinquantaine de kilomètres de digues non domaniales. Celle-ci s'est ensuite développée début 2020, sur l'axe Cher et, depuis l'été 2022, sur l'axe Allier. D'autres interventions relevant de l'appui technique d'intercommunalités ont été engagées en réponse aux sollicitations de ces collectivités, de même que l'engagement d'un travail de préfiguration de la reprise en gestion, à l'horizon janvier 2024, des digues domaniales sur les plateformes de Vichy, Orléans, Blois, Tours, et Angers.

Mots-clés

projet d'aménagement d'intérêt commun, gestion des systèmes d'endiguement, délégation de gestion, bassin fluvial, Loire

Abstract

With an intervention framework undergoing restructuring, regarding both territorial organization and public policies for water management and the associated natural hazards, in a context marked by strong uncertainties, for instance the assessment of the watershed and the impacts of climate change in terms of floods and droughts on the latter, the Loire River Basin Authority (EP Loire) took the initiative in October 2015 analyzing the opportunity and feasibility of a development project of Common Interest (PAIC) concerning flood protection works at the river basin scale. The results of this analysis (2017) made it possible to notice the opportunity and feasibility of the project in terms of strategy, economy and management, way beyond the refounding act of river basin solidarity. The approach adopted integrates operating and management synergies between “hard” infrastructure, such as dams (notably Villerest, owned by the Loire River Basin Authority) or levees, and “soft” infrastructure, such as flood expansion areas, allowing an integrated management of flood hazards.

The management of flood defence systems at the scale of the river basin by the Loire River Basin Authority is anchored in the extension of the actions carried out for nearly 40 years in the assessment and management of flood risks, based on its structure, guaranteeing a dialogue between communities, and aiming to ensure, within a coherent management scope, homogeneity of treatment, pooling and optimization of technical and financial resources.

Concretely, the purpose of the PAIC is the sustainable and coherent management on an appropriate scale of the flood defence systems of the watershed. Co-constructed with local authorities, it was approved in July 2021, and received a favorable opinion from the Loire-Bretagne basin committee the same year. The delegation of the management of the flood defence systems to the Loire River Basin Authority allows a pooling of human, technical and financial resources by strengthening the operability and reducing the costs thanks to economies of scale and the search for financing optimization. In operational terms, this project has been implemented since the summer of 2019 on the Angers platform with around fifty kilometers of non-state dykes, the management of which has been delegated to the establishment by the “EPCI”. This then developed at the beginning of the year 2020, on the Cher axis and since summer 2022, began on the Allier axis. Other interventions relating to the technical support of inter-municipalities have been initiated in response to requests from these local authorities, as well as the start of prefiguration work for the takeover of State dykes' management on the platforms of Vichy, Orleans, Blois, Tours, and Angers, by January 2024.

Key Words

Development project of common interest, management of levees systems, delegation of management, watershed, Loire

**Développement d'une approche BIM (Building Information Modeling)
pour l'amélioration de la sécurité des digues
de protection contre les inondations et couplage
avec le SIRS Digues**

*Development of a BIM (Building Information Modeling) approach to
improving the safety of flood protection levees and coupling with SIRS
Digues*

C. Curt¹, A. Talon², L. Journée^{1,2}, P. Di Maiolo¹, B. Beullac¹

¹ INRAE, Aix Marseille Univ., RECOVER – 3275 Route Cézanne – 13182 Aix en
Provence Cedex 5, France, corinne.curt@inrae.fr

² Université Clermont Auvergne - Polytech Clermont-Ferrand, Campus Universitaire
des Cézeaux – 2, avenue Blaise-Pascal – TSA 60206 – CS 60026,
63178 Aubière Cedex, France, aurelie.talon@uca.fr

Résumé

Le BIM (Building Information Modeling) est un processus efficace pour stocker, gérer des données, offrir des représentations multidimensionnelles et exploiter ces données pour gérer la maintenance des ouvrages hydrauliques. L'objectif est de proposer un usage du BIM pour les digues de protection contre les inondations en tant qu'ouvrages pouvant supporter/intégrer d'autres infrastructures (canalisations, routes, bâtiments etc.). Ces dernières peuvent être à l'origine de désordres au sein de la digue comme l'érosion interne ou un glissement. Une méthode a été développée et des applications réalisées sur des digues réelles comportant plusieurs infrastructures. Premièrement, une matrice rassemblant les caractéristiques d'intérêt des infrastructures a été proposée pour les 56 types d'infrastructures identifiés dans le SIRS Digues qui est un logiciel métier d'une partie des gestionnaires de digues en France : des caractéristiques génériques non modifiables (par exemple l'impact qu'ont les bâtiments sur la digue), des variables descriptives qui n'ont pas d'impact sur la modélisation (par exemple, le nom du propriétaire du bâtiment) et des variables de modélisation, propres à chaque famille d'infrastructure, qui sont les variables géométriques utiles à la représentation 3D des familles (par exemple, la famille bâtiment possède des variables comme hauteur et largeur). Ces variables sont ensuite instanciées pour chaque cas considéré (par exemple, le bâtiment a une hauteur de 3 m). Ces caractéristiques ont été établies à partir des connaissances d'experts des ouvrages hydrauliques. Deuxièmement, des données sont collectées afin de renseigner les variables descriptives et de modélisation. Plusieurs sources sont disponibles : les gestionnaires ; les documents sur l'ouvrage comme les Etudes De Dangers ou les Visites Techniques Approfondies et le SIRS Digues. Troisièmement, la maquette 3D de la digue est réalisée et les différentes infrastructures créées dans l'outil, en tant qu'objets caractérisés par les propriétés recensées dans la matrice de données. Trois méthodes de modélisation ont été proposées en fonction des données disponibles et de leur format. Une de ces méthodes a été automatisée. Quatrièmement, une validation est réalisée pour vérifier que le système modélisé correspond bien au système réel. Une représentation du système dont la précision dépend de la qualité initiale des données {Digue + Infrastructures} est obtenue, avec une centralisation des données. Un cas d'études sera présenté dans l'article. La démarche participe à une amélioration de la gestion patrimoniale et se veut collaborative entre les gestionnaires de digues et d'infrastructures.

Mots-clés

sécurité des digues, infrastructures, Building Information Modeling, gestion patrimoniale, SIRS Digues

Abstract

BIM (Building Information Modeling) is an effective process for storing and managing data, providing multi-dimensional representations and exploiting this data to manage the maintenance of hydraulic structures. The aim is to propose the use of BIM for flood protection levees as structures that can support/integrate other infrastructures (pipes, roads, buildings, etc.). The latter can be the cause of disorders within the levee, such as internal erosion or landslides. A method has been developed and applications carried out on real levees containing several infrastructures. Firstly, a matrix bringing together the infrastructure characteristics of interest was proposed for the 56 types of infrastructure identified in the SIRS Digues, a software package used by some of France's levee managers: non-modifiable generic characteristics (e.g. the impact that buildings have on the levee), descriptive variables that have no impact on modelling (e.g. the name of the building owner) and modelling variables, specific to each family of infrastructure, which are the geometric variables useful for the 3D representation of the families (e.g. the building family has variables such as height and width). These variables are then instantiated for each case considered (for example, the building has a height of 3 m). These variables are then instantiated for each case considered (for example, the building is 3 m high). These characteristics were established on the basis of expert knowledge of hydraulic structures. Secondly, data is collected to inform the descriptive and modelling variables. Several sources are available: the managers; documents on the structure, such as hazard studies or in-depth technical visits; and the SIRS Digues. Thirdly, the 3D model of the levee is produced and the various infrastructures created in the tool, as objects characterised by the properties listed in the data matrix. Three modelling methods were proposed, depending on the data available and its format. One of these methods was automated. Fourthly, a validation is carried out to check that the modelled system corresponds to the real system. A representation of the system {Levee + Infrastructures} is obtained, with centralised data; the precision depends on the initial quality of the data. One case study will be presented in the article. The approach helps to improve asset management and is intended to be a collaborative effort between levee and infrastructure managers.

Key Words

levee safety, infrastructure, Building Information Modeling, asset Management, SIRS Digues

Une méthode d'intégration environnementale
des projets de protection contre les inondations
*A method for the environmental integration
of flood protection projects*

D. Gateau¹

¹ Cerema, Brest, France, denis.gateau@cerema.fr

Résumé

Un rapport d'évaluation du dispositif de programme d'actions de prévention des inondations (PAPI), réalisé en 2019 par les inspections générales, faisait part des difficultés exprimées par les porteurs de projets, dans la prise en compte des enjeux environnementaux. Localement perçue comme un frein, voire un obstacle à la mise en œuvre des PAPI, la prise en compte de ces enjeux s'avère néanmoins indispensable. En effet, dans un contexte de changement climatique où la gestion de l'eau et l'érosion de la biodiversité constituent des préoccupations de premier ordre, l'évitement et la réduction des impacts négatifs méritent une attention particulière.

Afin de faciliter la prise en compte des enjeux environnementaux dans le cadre des projets d'ouvrages de protection contre les inondations, le Cerema a travaillé, à la demande de la direction générale de la prévention des risques, à une méthode articulant à chaque étape du projet, attendus du droit et recommandations de bonne prise en compte des enjeux écologiques. Basée sur une proposition d'entre-croisement des démarches de PAPI, de projet au sens de la commande publique, d'autorisations administratives et de consultation du public, elle vise à fluidifier la réalisation des projets en rappelant à chaque étape divers points d'attention. Elle s'appuie notamment sur le rôle des différents acteurs du projet et présente les principales procédures administratives applicables aux projets concernés.

Les PAPI sont soumis depuis peu à la réalisation d'une évaluation environnementale stratégique, complémentaire à l'évaluation environnementale des projets. Cette dernière vise une meilleure prise en compte du cumul, dans le temps et dans l'espace, de l'ensemble des impacts des mesures de prévention contre les inondations au niveau d'un même bassin hydrographique. A ce titre, une vigilance renforcée des porteurs de projets, en matière d'articulation de la démarche de projet avec la prise en compte des enjeux environnementaux et les exigences de la réglementation est nécessaire. L'article propose une méthode d'articulation des démarches de projet et d'évaluation environnementale, dont le détail est présenté au sein du guide « Enjeux écologiques et projets de protection contre les inondations : recommandations pour une prise en compte, des prémices du projet à l'exploitation des ouvrages ».

Mots-clés

évaluation environnementale, impact, PAPI, projet, intégration

Abstract

A evaluation report of the French flood prevention local programs (PAPI) delivered in 2019 by a ministerial audit mission, highlighted the difficulties encountered by local authorities in integrating environmental issues. Apprehended locally as a slowdown, or even an hindrance to the implementation of the PAPI, the integration of environmental issues is nevertheless essential. In the context of climate change, where water management and the erosion of biodiversity are major issues, the avoidance and reduction of negative impacts required special attention.

In order to facilitate environmental integration in flood control projects, the French public agency Cerema worked, at the request of the ministerial department of natural risks, on a method which articulates step by step, legal expectations and recommendations to improve the integration of ecological issues. Based on a proposal of interweaving between the PAPI, project stages as defined by the public procurement code, administrative authorizations and public consultation process, the method aims to facilitate the implementation of the project by highlighting various points of attention at each stage. In particular, it describes the roles of the various members involved in the project, and outlines the main administrative procedures required.

The PAPIs have recently undergone to a strategic environmental assessment, in addition to the environmental assessment of projects. The latter aims to take better account of the cumulative impact, in time and space, of all flood prevention measures within a given watershed. So, project owners must be even more vigilant in coordinating their project approach with environmental issues and regulatory requirements. The article proposes a method for linking the project and environmental assessment approaches, the details of which are presented in the French guide "Ecological issues and flood protection projects: recommendations for taking them into account, from the earliest stages of the project to the operation of the protective structures".

Key Words

environmental assessment, impact, flood-risk reduction program,
project, integration

Traitement des essences végétales envahissantes sur les ouvrages hydrauliques

Dealing with invasive plant species on hydraulic structures

C. Zanetti¹, N. Liency¹

¹ ARBEAUSOLutions, Belcodène, France, c.zanetti@arbeausolutions.fr

Résumé

La gestion de la végétation implantée sur les ouvrages hydrauliques, qu'il s'agisse de digues ou de barrages, s'avère complexe pour les gestionnaires. Un mauvais choix dans la définition de la stratégie de gestion peut rapidement conduire à l'aggravation de la problématique et ainsi à l'accroissement significatif des coûts d'entretien ou de réfection associés.

La renouée du Japon est à ce titre tristement célèbre. Mais bien d'autres espèces, moins connues mais également classées comme espèces végétales envahissantes avérées, méritent une attention particulière et l'adaptation des protocoles de gestion afin d'éviter leur expansion fulgurante. L'ailante (*ailanthus altissima*), le robinier (*robinia pseudo-acacia*), le faux-indigo (*amorphas fruticosa*), l'érable negundo (*acer negundo*), le buddléia (*buddleia davidii*) sont autant d'espèces à fort pouvoir de colonisation dont le développement devient rapidement immaîtrisable sur les ouvrages en bordure de cours d'eau.

Le mode de reproduction de ces essences est déterminant et doit être pris en compte pour espérer maîtriser leur propagation. Par exemple, l'ailante et le robinier drageonnent fortement ; ces 2 espèces ligneuses arborescentes ne doivent surtout pas être abattues au ras du collet sous peine de donner naissance à des drageons recouvrant des centaines de mètres carrés par arbre coupé. L'érable negundo, le faux-indigo et le buddléia se reproduisent quant à eux essentiellement par germination et par la production de nombreux rejets suite à leur coupe. Les interventions doivent donc être réalisées avant la production des graines et en évitant leur coupe rase.

Différents protocoles sont donc à déployer selon les essences et les problématiques spécifiques. Par exemple, le fauchage tardif permet d'éviter que les graines d'essences ligneuses n'atteignent le sol, le broyage très fréquent épuise les réserves des souches tandis que la purge des racines traçantes permet de limiter le drageonnement.

Les essences locales peuvent également devenir envahissantes lorsque les conditions de développement sont optimales ; cela est aussi le cas du peuplier qui, en tant qu'espèce pionnière, se développe dans les joints et fissures des parements en béton ou en bitume. Cela est également le cas des frênes qui colonisent densément les gabions et qui impliquent des contraintes de gestion très complexes sur ce type de matériaux. La dévitalisation des jeunes pousses est dans ces cas précis le moyen de prévenir la dégradation des ouvrages.

La gestion de la végétation doit donc être raisonnée et anticipée car comme le dit le célèbre adage « mieux vaut prévenir que guérir ».

Mots-clés

solutions de gestion, végétation, invasive, éradication, ouvrages hydrauliques

Abstract

Managing vegetation on hydraulic structures, as levees or dams, is a complex task for managers.

The wrong choice in defining a management strategy can quickly lead to a worsening of the problem and a significant increase in the associated maintenance or repair costs.

A famous example is Japanese knotweed which is the most fearsome. But there are many other lesser-known species that are also classified as proven invasive plant species, and which deserve special attention and the adaptation of management protocols to prevent their meteoric expansion.

Ailanthus (*ailanthus altissima*), black locust (*robinia pseudo-acacia*), false indigo bush (*amorpha fruticosa*), manitoba maple (*acer negundo*) and buddleia (*buddleia davidii*) are all highly invasive species whose growth could quickly become unmanageable on riverside structures.

The reproduction mode of these species is a determining factor and must be taken into account in order to control their expansion.

For example, ailante and robinia produce strong suckers; these 2 woody tree species should never be felled close to the collar, otherwise they will give rise to many suckers covering hundreds of square meters per each tree felled.

Manitoba maple, false indigo bush and buddleia reproduce by seed germination and by producing numerous shoots following tree felling. Work must therefore be carried out before the seeds are produced, and clear-cutting must be avoided.

Different protocols need to be deployed depending on the species and the specific context. For example, late grass mowing prevents the woody species seeds to reach the ground, frequent shredding depletes stump reserves and purging superficial roots limits suckering.

Local species can also have invasive behaviour when development conditions are optimal; for example, poplar, as a pioneer species, develops into the joints and cracks of concrete or bituminous coating after felled. As for ash trees, which grow densely in gabions and require very complex management on these type of structures. In these cases, ecological devitalization of young shoots is the best way to prevent structure damage.

Vegetation management must therefore be reasoned and anticipated: as the saying goes, "prevention is better than cure".

Key Words

management solutions, vegetation, invasive, eradication, hydraulic structures

**SIRS Dignes : un outil de gestion des ouvrages de protection
contre les inondations, façonnable, efficace
et en constante évolution**
*SIRS Dignes: A Flexible, Efficient, and Ever-Evolving Tool for Managing
Flood Protection Structures*

J. Perrin¹, V. Platz², P. Broust¹, B. Tournonnias¹

¹ Association France Dignes, Grenoble, France, contact@france-dignes.fr

² SYMBHI, Grenoble, France, veronique.platz@symbhi.fr

Résumé

La gestion des données d'ouvrages patrimoniaux et plus particulièrement celles relatives aux digues, aménagements hydrauliques et ouvrages assimilés, est cruciale que ce soit pour leur gestion technique (suivi, travaux, conception, etc.) ou réglementaire. C'est en partant de ce constat que le logiciel métier SIRS (Système d'Information à Référence Spatiale) Dignes a été conçu et pensé il y a maintenant plus de 20 ans par le CEMAGREF (Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts, aujourd'hui INRAE, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) et développé avec des gestionnaires. Véritable banque de données des ouvrages de protection contre les inondations et des cours d'eau, il a évolué au fil des besoins et des évolutions de la réglementation, pour devenir aujourd'hui un support central dans la gestion des données et de suivi de ces ouvrages en milieu torrentiel, fluvial et maritime. Il est désormais utilisé au quotidien par une trentaine de structures gestionnaires et par leurs prestataires.

L'outil s'appuie sur une communauté d'utilisateurs toujours plus importante et experte pour identifier les besoins et anticiper ceux à venir. Une mise à jour continue par le développement et le perfectionnement du SIRS Dignes permettent depuis plusieurs années sa permanente adéquation aux besoins quotidiens des gestionnaires. Le retour d'expérience nous montre également que même si l'outil a été conçu pour normaliser les usages entre gestionnaires, SIRS laisse toutefois une part de champ libre à l'exploration, l'exploitation et l'expression des utilisateurs pour créer ses propres réponses à ses besoins.

Gestion des aménagements hydrauliques (récemment intégrée), création automatique de rapports, du dossier d'ouvrage et du registre numérique, projet de recherche d'évaluation de la performance des digues, planification de travaux et suivi de chantier, application mobile ou encore gestion des ouvrages ante/pendant/post-crue sont autant d'évolutions notables et non exhaustives du SIRS depuis sa création. Elles font du SIRS un outil au goût du jour et façonnable. L'objet de cet article est de détailler le processus d'évolution de l'outil, en revenant sur ses objectifs et sa conception. Il vise également à mettre en avant les nouveautés techniques et physiques qui permettent aujourd'hui au logiciel de répondre aux obligations réglementaires du gestionnaire, mais également d'être un réel appui à la conception, la gestion et le suivi des ouvrages de protection.

Mots-clés

SIG, base de données, patrimoine, digues, outil

Abstract

The management of data for heritage structures, particularly those related to dikes, hydraulic structures, and similar works, is crucial both for technical management (monitoring, maintenance, design, etc.) and regulatory purposes. Recognizing this need, the SIRS (Spatial Reference Information System) Dignes software was developed and conceptualized over 20 years ago by CEMAGREF (National Center for Agricultural Machinery, Rural Engineering, Water, and Forestry, now known as INRAE, National Research Institute for Agriculture, Food, and Environment) and managers. Real database of flood protection structures and watercourses, it has evolved over time to meet the needs and regulatory changes, becoming today a central support in the management and monitoring of these structures in torrential, riverine, and maritime environments. It is now used daily by around 30 management entities and their service providers.

The tool has adapted by relying on an increasingly large and expert community to identify current and future needs. A continuous updates have been the driving force behind its ongoing development and constant improvement in recent years. Despite its apparent rigidity, the SIRS also allows users to explore, exploit, and customize their own solutions to meet their specific requirements.

Notable and non-exhaustive advancements of the SIRS since its inception include the management of hydraulic structures (recently integrated), automatic report generation, digital document and registry creation, research projects to evaluate dike performance, work planning and site monitoring, mobile application support, as well as pre/during/post-flood structure management. These developments have transformed the SIRS into a modern and adaptable tool. The objective of this article is to detail the tool's evolution process, revisiting its objectives and design. It also aims to highlight the technical and physical innovations that currently enable the software to meet regulatory requirements for managers while providing real support for the design, management, and monitoring of protection structures.

Key Words

GIS, database, heritage, dykes, tool

Cartographie numérique interactive du risque d'inondation du Rhône - de l'étude de dangers au développement de la culture du risque

Interactive digital mapping of the Rhône flood risk from hazard studies to the development of a risk culture

**T. Mallet¹, A. Darnaud¹, A. Castagnet¹, C. Dast¹,
L. Jarmasson², T. Thierry²**

¹ SYMADREM, Arles, France, symadrem@symadrem.fr

² Canopée, Arles, France, lionel.jarmasson@canopee.cc

Résumé

Depuis 2010, le SYMADREM réalise les études de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux du grand delta du Rhône. Ces études se sont concrétisées en 2022 par la ré-autorisation de l'ensemble de ces systèmes au titre du décret digues de 2015 modifié. Conformément aux dispositions fixées par ce décret, le SYMADREM a procédé à l'information des autorités compétentes en matière de secours sur les niveaux de protection apportés par ces systèmes et sur les risques encourus, une fois ces niveaux dépassés (art. R214-116 CE).

Le SYMADREM a décidé d'aller au-delà de ces obligations réglementaires en mettant à disposition du public les résultats issus des études de dangers, sous une forme cartographique simplifiée et interactive. Cet outil numérique, construit à partir de données et de fonds de cartes très précis, permet à chaque habitant du grand delta, protégé par les digues du Rhône, de visualiser immédiatement et de comparer des résultats en fonction des critères sélectionnés par l'internaute. C'est une approche ergonomique et pédagogique (tout en restant très technique), qui permet de connaître à l'échelle d'un logement :

- les hauteurs d'eau atteintes par le Rhône, lors des inondations passées ;
- le niveau de protection pieds secs « garanti » par le SYMADREM, exprimé en débit du Rhône à la station vigicrue Beaucaire/Tarascon, située en tête du grand delta ;
- au-delà de ce niveau de protection, les hauteurs d'inondation probables à certaines, en fonction de ce même débit.

La cartographie interactive répond ainsi à deux objectifs : entretenir la mémoire des inondations passées et permettre aux habitants de mieux connaître leur exposition au risque actuel et favoriser ainsi le développement d'une véritable culture du risque à l'échelle du territoire. Les habitants peuvent également mesurer à l'échelle de leur habitation, le bénéfice des travaux réalisés dans le cadre du Plan Rhône ou le bénéfice attendu des travaux à venir dans les prochaines années.

L'article décrit les différentes étapes de construction de cette cartographie et conclut sur les apports de la réglementation 2015 dans la gestion intégrée du risque inondation et sur la nécessité de poursuivre ces évolutions.

Mots-clés

inondation, culture du risque, étude de dangers, interactif

Abstract

Since 2010, SYMADREM has been carrying out hazard studies on levees systems in the Rhône large delta. These studies have been achieved in 2022 with the re-authorisation of all these systems under the new regulation of 2015 about levees.

In accordance with the provisions of this decree, SYMADREM has informed the relevant emergency authorities of the levels of protection provided by these systems and of the risks incurred once these levels have been exceeded (art. R214-116 EC).

SYMADREM has decided to go beyond these regulatory obligations by making the results of the hazard studies available to the public in simplified, interactive map form. This digital tool, based on highly accurate data and maps, enables every resident of the large delta protected by the Rhone levees to immediately view and compare the results according to the criteria selected by the Internet user. It's an ergonomic and educational (though still highly technical) approach, providing information at the scale of a single home:

- the heights of water reached by the Rhône during past floods;
- the level of dry-foot protection "guaranteed" by SYMADREM, expressed in Rhône flow at the Beaucaire/Tarascon station located upstream of the large delta;
- beyond this level of protection, the probable flood heights, based on the same flow rate.

The interactive map thus meets two challenges: to keep alive the memory of past floods and to give residents a better understanding of their exposure to the current risk, thereby encouraging the development of a genuine risk culture throughout the region.

Residents will also be able to see, in their own homes, the benefits of the work carried out as part of the Rhône Plan and the expected benefits of the work to be carried out in the coming years. The article describes the various stages in the construction of this mapping and concludes with the contributions of the 2015 regulations to integrated flood risk management and the need to continue these developments.

Key Words

flooding, risk culture, hazard studies, interactive

Surveillance et intervention d'urgence en période de crue :
sécurisation du dispositif
et fonctionnement en mode dégradé
*Monitoring and emergency response during flood periods: securing the
device and operating in degraded mode*

S. Chardes¹, A. Castagnet¹, C. Dast¹, T. Mallet¹, N. Issart²

¹ Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des digues du delta du Rhône
et de la Mer – SYMADREM, Arles, France, symadrem@symadrem.fr

² Ville d'Arles – Arles, France, nicolas.issart@ville-arles.fr

Résumé

Le SYMADREM gère quatre systèmes d'endiguement fluviaux et un système d'endiguement maritime sur plus de 250 km d'ouvrages de protection. En période de crue, il déploie un dispositif de surveillance spécifique permettant de détecter, au plus tôt, les éventuels désordres. Ce dispositif prévoit la surveillance des ouvrages sur le terrain par des équipes communales. Des travaux d'urgence peuvent être effectués par une entreprise, si nécessaire. Un poste de commandement composé d'agents du SYMADREM est en contact radio permanent avec les équipes communales et l'entreprise.

Suite aux événements passés et à ses exercices de simulation de crues, le SYMADREM a identifié différents points de faiblesses dans son dispositif. Il a ainsi défini différentes pistes d'amélioration. Depuis 2011, il met en œuvre des opérations ayant pour but d'améliorer et de sécuriser chaque maillon de son dispositif de surveillance depuis la prévision des crues, jusqu'aux interventions d'urgence. Ces améliorations concernent aussi bien l'organisation des procédures, le développement d'outils que la réalisation des travaux d'urgence.

Il a fallu, tout d'abord, sécuriser la prévision de crues par le déploiement d'un outil indépendant, propre au syndicat. Ensuite, l'installation de divers équipements sur les ouvrages tels que des bornes de repère a permis de faciliter la détection de désordres par les équipes de surveillance. Par ailleurs, des aménagements spécifiques ont été déployés pour augmenter la rapidité d'intervention de l'entreprise de travaux d'urgence (rendre les digues carrossables, créer des aires de stockage de matériaux...).

En complément de ces opérations, le SYMADREM a fiabilisé et sécurisé son poste de commandement pour faire face à toutes les situations dégradées susceptibles de se produire tels que des coupures électriques, des pertes de connexion internet et d'accès aux réseaux...

Gagner en rapidité de détection et d'intervention reste l'objectif principal de cette sécurisation, afin d'éviter que le désordre ne se transforme en brèche.

Mots-clés

crue, sécurisation, surveillance, urgence, dégradé

Abstract

The SYMADREM (Public institution for management of river and sea levees in the Rhône delta) manages four levees systems and one sea levees system on more than 250 km of safety works. In flood period, it displays a monitoring device which allows to detect, at the soonest, the potential damages. This device plans supervision of the works by municipal teams. In case of need, emergency works can be carried out by contractors. A team of SYMADREM agents, settled in a control room, is in permanent radio contact with the municipal teams and the contractors.

Following the past events and its flood simulation exercises, the SYMADREM detected different weaknesses in its monitoring device. Thus, it determined some improvement measures. Since 2011, it implements operations aiming to improve and secure each chain link of its monitoring device, from the flood forecast to the emergency procedures. These improvements fit just as well for the processes organization, tools development than for works accomplishment.

First, we had to secure the flood forecast by displaying a tool specially dedicated to our institution. Then, the installation of diverse facilities on the works, such as landmark plates, allowed to ease the damages detection by the monitoring teams. Furthermore, specific installations were spread to increase the emergency work company intervention velocity (make the levees driveable, build storage areas for materials...).

In addition to these operations, the SYMADREM made reliable and secured its command post to face all the degraded situations susceptible to occur, such as power outage, loss of internet connection and impossibility to access the networks...

Gain in detection and intervention speed remains the main goal of this securing, in order to prevent the damage before becoming a breach.

Key Words

flood, to secure, monitoring, emergency, degraded

**Impacts directs et indirects de la tempête Alex
sur la surveillance des crues et la gestion des digues
sur le territoire maralpin**

*Direct and indirect impact of storm Alex on flood monitoring and levees
management in the maralpine area*

L. Salvan¹, R. Dreyfus¹, J. Poggio¹

¹ SMIAGE Maralpin, 06204 Nice, l.salvan@smiage.fr

Résumé

Le territoire maralpin a connu plusieurs épisodes de crues majeures et plus particulièrement au cours de la dernière décennie. Depuis sa création en 2017, le Syndicat Mixte Inondations Aménagement et Gestion de l'Eau SMIAGE Maralpin a renforcé la surveillance des ouvrages hydrauliques classés sous sa responsabilité, notamment à travers des outils de surveillance hydrométéorologiques et un dispositif d'astreinte robuste.

L'astreinte du syndicat est composée de 55 agents formés à plusieurs rôles, du terrain au centre opérationnel départemental (COD). Elle permet notamment d'anticiper d'éventuels désordres sur les ouvrages surveillés, qui s'étendent sur un linéaire de 40 kilomètres. Cette anticipation est nécessaire pour faire face aux dynamiques radicalement opposées des cours d'eaux du territoire, entre côtiers urbains et torrents de montagne à réactions explosives en passant par le fleuve Var, qui présente des temps de montée bien plus lents. Ils sont surveillés à travers les prévisions de débits du Service de Prévision des Crues Méditerranée Est et du SMIAGE, selon le cours d'eau concerné. L'instrumentation déployée au sol permet de combler des manques de données pour le suivi temps réel mais aussi pour les modèles de prévision, à court et moyen terme.

Le retour d'expérience met en exergue certains constats sans appel. Le manque de données de prévision des crues ou bien la sous-estimation des pluies sur les têtes de bassins versants, sont des éléments avec lesquels les acteurs de la gestion de crise ont dû composer pour assurer leurs missions. Au cours des deux premières vigilances rouges historiques du département à l'automne 2019, puis lors de la tempête Alex le 2 octobre 2020, le dialogue entre le gestionnaire des digues et les communes s'est révélé central.

La gestion de crise passée, la décrue a engendré des désordres qu'il a fallu recenser. Sur la basse-vallée du Var, bien moins touchée comparée aux vallées du haut-pays, les digues ont été impactées physiquement avec 5 Événements Importants pour la Sûreté Hydraulique (EISH), mais surtout administrativement. Il a fallu apporter des modifications aux dossiers en cours d'instruction pour la régularisation des systèmes d'endiguement ainsi qu'aux études de dangers. Les événements hydrologiques intenses, tels que la tempête Alex, montrent l'importance de l'actualisation des études de dangers et des consignes de surveillance des ouvrages.

La tempête Alex a éprouvé le dispositif d'astreinte du SMIAGE, la gestion des digues, ainsi que l'organisation en post-crue, poussant le syndicat à s'améliorer pour se préparer aux prochaines crises.

Mots-clés

digues, crue, EISH, RETEX, gestion de crise

Abstract

The Maralpin territory has experienced several episodes of major floods, especially over the past decade. Since its creation in 2017, the Syndicat Mixte Inondations Aménagement et Gestion de l'Eau SMIAGE Maralpin has strengthened the supervision of hydraulic structures classified under its responsibility, particularly through hydrometeorological monitoring tools and a robust on-call system.

The on-call of the SMIAGE is organized with 55 agents trained in several roles, from field patrols to the departmental operational center (COD). In particular, it makes it possible to anticipate disorders on the supervised structures, which extend over a linear of 40 km. This anticipation is necessary to face the opposite dynamics of the territory's waterways, between urban coastal and mountain torrents with explosive reactions and the Var River, which presents much slower response. They are monitored through the flow forecasts of the Eastern Mediterranean Flood Forecasting Service (SPC Medest) and the SMIAGE, depending on the river concerned. The instrumentation deployed on the ground fills data gaps for real-time monitoring but also for forecasting models, for short and medium term.

Feedback highlights some clear weaknesses. To ensure their missions, actors of crisis management had to deal with the lack of flood forecasting data as well as the underestimation of rainfall on the heads of watersheds. During the department's first historic red weather warnings at the end of 2019, then during Storm Alex on October 2, 2020, the dialogue between the dam manager and the municipalities has proved to be central.

After the crisis management of floods, disorders had to be recorded which have been generated by water level fall. On the lower Var valley, much less affected compared to the upper part of the basin, the dikes were physically impacted with 5 Important Events for Hydraulic Safety (EISH), but especially administratively. Changes had to be made to the management files under examination for the regularization of dyking systems and to the hazard assessment studies (EDD). Intense hydrological events, such as Storm Alex, show the importance of updating these studies and monitoring instructions for hydraulics works.

Storm Alex has tested the SMIAGE on-call system, the management of the dikes, as well as the organization in the aftermath. The SMIAGE is now better prepared for the next crises.

Key Words

dykes, flood, Events for Hydraulic Safety (EISH), feedback, crisis management

De la gestion en crue vers la gestion de crise : un groupe de travail
pour accompagner les gestionnaires de digues
*From Management during the flood to Crisis Management:
A working group to Support Dyke Manager*

E. Rey¹, P. Broust¹, B. Tournonnias¹, V. Platz², E. Gracia-Lavedrine³

¹ France Dignes, Grenoble, France, contact@france-digues.fr

² SYMBHI, Grenoble, France, contact@symbhi.fr

³ SMAAVO, Simandres, accueil@smaavo.fr

Résumé

L'association France Dignes, composée de plus de 140 adhérents, rassemble des syndicats mixtes, Etablissements Publics Territoriaux de Bassin (EPTB), collectivités et autres structures ayant en gestion des ouvrages de protection contre les inondations. Elle a pour mission, depuis 2013, de structurer et consolider la profession de gestionnaire de digues en construisant un réseau qui leur est dédié. En 2023, l'association a créé un Groupe de Travail (GT) intitulé « astreinte et anticipation de crue », qui réunit une vingtaine d'adhérents ainsi que le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement). L'IRMa (Institut des Risques Majeurs) vient également apporter son regard sur les travaux.

Le GT a pour objectif d'accompagner le passage de relais entre la gestion en crue et la gestion de crise, en proposant des outils pour faciliter la transmission d'informations sur les ouvrages de protection contre les inondations. Pour ce faire, un questionnaire a été distribué début 2023 aux adhérents de France Dignes pour cibler les besoins et attentes des gestionnaires autour des questions liées à l'organisation en crue (surveillance, interventions d'urgence, etc.) et notamment la mise en place d'une astreinte de surveillance. Il a nourri les réflexions du GT pour définir collectivement des objectifs et un axe de travail. Dans cette perspective, le GT a lancé l'élaboration de fiches réflexes qui serviront de supports aux gestionnaires d'ouvrages pour transmettre rapidement et efficacement les informations essentielles sur les ouvrages aux autorités en charge de la gestion de crise. L'objectif est une appropriation rapide des informations techniques pour une meilleure connaissance des ouvrages et des risques associés, à des fins opérationnelles. Ces fiches seront à personnaliser par les gemapiens, en concertation avec les différents acteurs, pour être utilisées *in fine* par les gestionnaires de crise. Elles bénéficieront particulièrement aux « néo-gestionnaires » qui manquent parfois d'outils. Le format retenu est un livret au format A4, composé de 16 fiches synthétiques et de 2 annexes grand format, accompagnées de notices d'utilisation pour faciliter leur personnalisation. Ces supports ont le double avantage de donner un support de réflexion et de concertation aux acteurs, et de permettre à chacun de s'approprier rapidement et efficacement les informations pour une utilisation sur le terrain. En termes de méthodologie, le GT est parti de l'existant en collectant des exemples auprès du réseau d'adhérents pour en analyser le contenu et proposer un panel de fiches. Le calendrier prévoit une diffusion des livrables en 2024 et une présentation lors du Colloque digues 2024.

Mots-clés

France Dignes, groupe de travail, ouvrages en crue, gestion de crise, fiches réflexes

Abstract

The association "France Dignes," that counts over 135 members, brings together syndicates, Public Territorial Establishments for Water Management and Aquatic Environments (EPTB), local authorities, and other competent structures in Flood Risk Prevention (GEMAPI). Its mission, since 2013, is to structure and strengthen the profession of dyke managers by building a dedicated network. In 2023, the association established a working group called "Flood Monitoring and Anticipation," (*astreinte et anticipation de crue*) which brings together about twenty members, including the CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) and IRMa (Institut des Risques Majeurs).

The objective of this working group is to support the transition between flood management and crisis management by proposing tools to facilitate the transmission of information about flood protection structures. To achieve this, a questionnaire was distributed to the members of France Dignes at the beginning of 2023 to identify the needs and expectations of the managers regarding flood organization (monitoring, emergency interventions, etc.), especially concerning the establishment of a monitoring system. The questionnaire inputs guided the working group's discussions in collectively defining objectives and a work axis. With this perspective, the working group aims to develop practical "reflex-decision cards" that will serve as a tool for dyke managers to swiftly and effectively transmit essential information about the structures to the authorities responsible for crisis management. The goal is to ensure quick appropriation of technical information for better knowledge of the structures and associated risks, for operational purposes. These "reflex-decision cards" will be customizable by GEMAPI actors, in consultation with different stakeholders, to ultimately be used by crisis managers. They will be particularly beneficial for "new managers" who may sometimes lack of the necessary tools. The chosen format is an A4 booklet, constituted by 16 concise sheets and 2 annexes to be filled in and accompanied by instructions for easy customization. These tools have the dual advantage of providing a basis for reflection and consultation among stakeholders and enabling rapid and efficient assimilation of information, for a practical application. As for the methodology, the working group started with existing examples by collecting samples from the network of members to analyze their content and propose a panel of sheets. The timeline foresees the dissemination of the deliverables in 2024 and a presentation during the Dignes Symposium 2024.

Key Words

France Dignes association, working group, dykes during the flood,
reflex-decision cards, crisis management

Mise en perspective de la situation des digues en France
par comparaison avec les ouvrages de protection
contre les inondations d'autres pays dans le monde
*Putting into perspective the French levees situation
by comparison with flood protection structures in other countries
around the world*

S. Patouillard¹, Y. Deniaud², B. Beullac³, R. Tourment³

¹ DREAL Centre – Val de Loire (DETL), Orléans, France,
sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

² Cerema, Plouzané, France, yann.deniaud@cerema.fr

³ INRAE, RECOVER, Aix Marseille Université, Aix-en-Provence, France,
bruno.beullac@inrae.fr

Résumé

Depuis longtemps, les ingénieurs œuvrant sur les digues de protection contre les inondations sont amenés à échanger avec leurs homologues étrangers pour faire progresser les connaissances. Comme en témoigne, par exemple, l'action de la commission des ingénieurs étrangers suite à la crue catastrophique de 1879 à Szegedin en Hongrie (Annales des Ponts et Chaussées 1890). Plus récemment, le bulletin de la commission internationale des grands barrages (CIGB) "*Levees and flood defences across the world - Characteristics, Risks and Governance*" apporte un premier bilan de la situation des ouvrages de protection contre les inondations et des problématiques associées pour une vingtaine de pays comportant plus de 1 000 km de digues. Ce rapport, d'abord initié par un groupe d'experts européens, a été approuvé lors du dernier congrès de la CIGB qui s'est tenu à Marseille en juin 2022. Le rapport comprend une partie de synthèse et des parties détaillées pour chaque pays. La synthèse donne un aperçu global des ouvrages étudiés : leur ancienneté qui, pour certains, date de plusieurs millénaires, leur dimension qui représente plus d'un demi-million de kilomètres, leur rôle de protection qui concerne plus de 700 millions de personnes soit 10 % de la population mondiale. Les parties concernant chaque pays abordent les items suivants : faits et chiffres sur les digues, enjeux protégés et normes de sécurité, inondations récentes et ruptures de digues, législation et gouvernance, lignes directrices et bonnes pratiques, cycle de vie de la digue et besoins en termes de connaissances. L'objet de l'article est de présenter dans une première partie une synthèse de l'état des lieux des digues en France en suivant les items du bulletin et en mettant l'accent sur leurs spécificités françaises, dans une deuxième partie de donner les tendances et ordres de grandeurs de la situation pour l'ensemble des pays étudiés et, dans une troisième partie, de proposer une approche comparative des données de la France avec ces pays. Les données se révèlent encore trop fragmentaires pour assurer une bonne comparaison de la situation entre les pays, néanmoins les auteurs présentent quelques résultats de cette approche conduisant par exemple à proposer une première évaluation du patrimoine mondial des digues en termes de linéaire d'ouvrages et de population concernée.

Mots-clés

digues, inondations, gouvernance, données, patrimoine

Abstract

Engineers working on flood defences have long been involved in exchanges with their foreign counterparts in order to advance knowledge, as illustrated by the work of the Committee of Foreign Engineers following the catastrophic flood of 1879 at Szegedin in Hungary (*Annales des Ponts et Chaussées* 1890). More recently, the bulletin of the International Commission on Large Dams (ICOLD) "Levees and flood defences across the world - Characteristics, Risks and Governance" provides an initial assessment of the situation of flood defences and the associated issues for some twenty countries, each of which has more than 1,000 km of levees. Initially written by a group of European experts, the report was approved during the last ICOLD congress, held in Marseille in June 2022. The report includes a summary section and detailed sections for each country. The summary gives a global overview of the structures studied: their age, some of which dates back several millennia, their size, which represents more than half a million kilometers, and their protection role, which affects more than 700 million people, i.e. 10% of the world's population. The sections on individual countries cover the following items: facts and figures on levees, protected stakes and safety standards, recent floods and levee failures, legislation and governance, guidelines and good practice, the levee life cycle and knowledge needs. The purpose of this article is to present, in the first part, a summary of the situation of levees in France, based on the bulletin sections and highlighting French specific features; in the second part, to give trends and orders of magnitude for the situation in the other countries studied; and finally, in the third part, to propose a comparative approach between France and those countries. The overall data is still too fragmentary to ensure a precise comparison of the situation between countries, but the authors present some of the results of this approach, leading, for example, to an initial assessment of the world's levees portfolio in terms of levees length and affected population.

Key Words

levees, flooding, governance, data, heritage

ANNEXE 1 - FRANCE (2022)

FR : Faits et chiffres sur les digues et les défenses contre les inondations en France

La longueur de la France est constituée de 11 grands bassins hydrographiques ; 6 sur le littoral atlantique (Figure 19.1) et 5 autres. Ces derniers ne sont pas toujours dans le respect. Deux grands bassins d'élevages hydrolytiques sont généralement classés en protection contre les inondations (Figure 49.2).

- Digue et structure antérieure dont le but est d'empêcher l'eau de la mer, d'une rivière, d'un lac ou d'un torrent d'inonder une zone dite "protégée".
- Barrage ou levée de rétention des crues d'intensité forte (figure 19.1) et de la mer et de protéger les zones de crue d'inondation le plus de possible de la crue, qui finit de traverser généralement que sur les zones à caractère d'écoulement non ou peu dérivé (fonction active que la rétention des crues).

LEVEES	PROTEGÉS	PROTEGÉS	PROTEGÉS	PROTEGÉS
SAISON	SAISON	SAISON	SAISON	SAISON
PROTEGÉS	PROTEGÉS	PROTEGÉS	PROTEGÉS	PROTEGÉS
(km)	(km)	(km)	(km)	(km)
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,000	3000	300
Adour-Garonne	300,000	170,000	4000	370
Seine-Normandie	300,000	170,000	4000	370
Paris-Bassin	300,000	170,		

Thème 2

Ouvrages et systèmes de protection et stratégies de gestion des risques inondations

Comité scientifique

Animateurs des relectures

Thierry Monier	Expert individuel
Anton Schleiss	EPFL

Animateurs de la session orale

Thierry Monier	Expert individuel
Yann Eglin	Métropole du Grand Paris / Syndicat intercommunal d'aménagement du Chablais

Relecteurs

Gérard Degoutte	CTPBOH
Rémy Tourment	INRAE

**Déploiement d'une stratégie sur le littoral de Camargue :
diagnostic de territoire et réponses possibles**
Strategy for the Camargue coastline: diagnostic and possible solutions

C. De Paris¹, F. Matéo¹, T. Manicacci¹, T. Mallet¹

¹ SYMADREM, Arles, France, symadrem@symadrem.fr

Résumé

Face aux risques de submersion marine et d'érosion côtière auxquels est exposée la Camargue, le Symadrem est chargé d'élaborer une stratégie interrégionale d'intervention sur le littoral. Cette démarche s'inscrit dans un contexte de montée des eaux liée au changement climatique, rendant d'autant plus vulnérable le territoire.

Le Symadrem est le gestionnaire historique de 30 km de digue maritime et d'ouvrages de maintien du trait de côte (épis, brise-lames, tenons) sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer. Depuis 2020, il est l'autorité compétente en matière de GEMAPI sur le territoire du Grand Delta du Rhône. Sa compétence comprend désormais la défense contre la mer et la gestion intégrée du trait de côte sur les quatre communes littorales du territoire, ce qui représente un linéaire de 100 km environ.

Si seules ces quatre communes sont concernées par le risque d'érosion côtière, environ 15 le sont par le risque de submersion marine. On estime que 16 000 logements pourraient être touchés par une submersion lors d'une tempête majeure, quand 500 logements seraient touchés par l'érosion du trait de côte à l'horizon 2100.

Le déploiement de la stratégie est réalisé en concertation avec les acteurs du territoire. Trois échelons ont été définis pour la gouvernance : un comité technique restreint réunissant le Symadrem, l'Etat et des experts, un comité technique réunissant une trentaine de structures impliquées dans le grand cycle de l'eau, et un comité de pilotage réunissant environ 120 structures du territoire. Ce choix permet d'allier efficacité et concertation.

Le diagnostic préalable comporte un recensement exhaustif des enjeux anthropiques (logements, entreprises, parcelles agricoles) et dresse un état des lieux du territoire face aux deux risques précités. Il détaille notamment leur évolution prévisible dans les décennies à venir, si aucun aménagement complémentaire n'est réalisé. Enfin, le diagnostic est complété par une analyse économique qui estime le Dommage Moyen Annualisé (DMA) associé au risque actuel de submersion marine, et son augmentation prévisible en 2030, 2050 et 2100, en tenant compte des hypothèses du GIEC concernant l'élévation du niveau marin moyen mondial.

Des solutions de réponse possible sont à l'étude. Elles devront être efficaces, durables et soutenables financièrement par le territoire. Leur définition devra également tenir compte des enjeux environnementaux forts sur le territoire et des contraintes réglementaires.

Mots-clés

littoral, submersion marine, érosion côtière, Camargue, diagnostic

Abstract

The Camargue is confronted to coastal flooding and coastal erosion, thus the SYMADREM (Public institution for management of river and sea levees in the Rhône delta) is in charge of elaborating an inter-regional strategy of intervention on the coastline. This action falls into a sea-level rise context linked to the climate change, making the territory more vulnerable.

The SYMADREM is the historical manager of 30 km coastal levee system, groins and breakwater located in the Saintes-Maries-de-la-Mer town. Since 2020, it is the competent authority in GEMAPI (French acronym for Aquatic environment management and flood prevention) on the Rhône Delta Territory. Its expertise includes from now on, the coastal flood protection and the coastline management, along the four coastal towns of the territory, which represents around 100 km linear.

If only these four cities are concerned by the coastal erosion risk, around 15 are, for their part, concerned by the coastal flooding. We estimate that 16 000 housing estate could be impacted by a submersion during a major flood, when 500 housing estate would be impacted by the coastal line erosion by 2100.

The deployment of the strategy is made in concertation with the territory stakeholders. Three levels were defined for the governance: a restricted technical committee gathering the SYMADREM, the State and experts, a technical committee gathering around thirty structures involved in the great water cycle and a steering committee gathering around 120 territory structures. This choice allows to combine effectiveness and concertation.

The preliminary diagnostic includes an exhaustive census of housing, firms, agricultural parcels, and draw up an inventory of the territory facing the two above-mentioned risks. It details notably their foreseeable evolution in the coming decades, if no complementary construction work is done. Finally, the diagnostic is completed by an economical analysis which evaluates the Annual Average Damage (DMA in French) linked to the actual risk of coastal flooding, and its predictable increase in 2030, 2050 and 2100, reflecting the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) assumptions regarding the sea-level rise.

Key Words

coastal flood, coastal erosion, Camargue, diagnostic

Définition et études de dangers des systèmes d'endiguement de la Métropole du Grand Paris

Definition and hazard studies of the levee systems of Metropole du Grand Paris

**Y. Eglin¹, O. Sauron², A. Mazoyer³, J. Savatier⁴, A. Michaud⁴,
J. Cau⁵, P. Vaillant⁶**

¹ Métropole du Grand Paris, Paris, yann.eglin@metropolegrandparis.fr

² Sepia conseils, Paris, osauron@sepia-conseils.fr

³ BRL Ingénierie, Nîmes, Antonin.Mazoyer@brl.fr

⁴ ISL Ingénierie, Paris, savatier@isl.fr, michaud@isl.fr

⁵ Prolog Ingénierie, Paris, cau@prolog-ingenierie.fr

⁶ Artelia, Choisy-le-Roi, pauline.vaillant@arteliagroup.com

Résumé

La Métropole du Grand Paris a été créée en 2016 et s'est vue attribuer la compétence GEMAPI en 2018. La collectivité s'est alors lancée dans un processus de reprise de la gestion des digues participant à la protection de son territoire. Au-delà des difficultés liées aux questions de transition avec les gestionnaires historiques, cette organisation a aussi dû se faire dans le contexte d'un changement profond de la définition réglementaire de la notion d'ouvrage de protection induit par le décret digue de 2015, et des obligations associées.

La première difficulté pour la Métropole a été de déterminer ce qui constitue un ouvrage de protection à intégrer à son système d'endiguement. Dans le cadre d'ouvrages existants, la Métropole est repartie du niveau de dimensionnement d'origine des ouvrages pour identifier les zones qui pourraient être protégées, puis identifier tous les ouvrages qui participent à la protection de ces zones. Cela a fait ressortir une large variété d'ouvrages :

- des ouvrages de protection qui étaient déjà bien identifiés et sur lesquels se concentrait la gestion : les murettes, les batardeaux sur toutes les ouvertures, les aqua barrières ;
- des ouvrages annexes dont la gestion n'avait jamais été coordonnée avec celle des murettes : les ouvrages contributifs de type remblais d'infrastructure, bâtiments, piles de pont, perrés et confortements de berges.

Ce recensement a aussi fait ressortir des points de contournement des systèmes d'endiguement pour lesquels la Métropole ne disposait d'aucun élément pour évaluer leur influence en crue : les ouvrages traversants, qui constituent actuellement les éléments les plus limitants pour le niveau de protection.

Dans ce contexte, la seule solution trouvée avec les services de l'État, pour préserver l'autorisation des digues au sein de système d'endiguement, est une autorisation limitée, avec une obligation pour la Métropole de réaliser à court terme un vaste chantier d'amélioration de la connaissance sur ces ouvrages traversants.

Enfin, l'organisation implique de multiples acteurs. À la prise de compétence, il a été nécessaire pour la Métropole d'organiser la transition entre les gestionnaires historiques des murettes, avec finalement 5 cas de figure différents sur le territoire. Pour les années à venir, il s'agit pour la Métropole de conventionner avec l'ensemble des gestionnaires de réseaux et ouvrages contributifs afin de garantir la fiabilité de la gestion des systèmes d'endiguement.

Mots-clés

système d'endiguement, réseau traversant, ouvrage contributif,
convention de gestion, niveau de protection

Abstract

The Metropole du Grand Paris was created in 2016 and was granted GEMAPI (Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) competence in 2018. The local authority then embarked on a lengthy and complex process of taking over the management of dikes that contribute to the protection of its territory. Over and above the difficulties linked to the transition with the historical managers, this endeavor also had to be carried out within the context of a profound change in the regulatory definition of protection structures, as induced by the 2015 dike decree and its associated obligations.

The first difficulty for the Metropole was to determine what constitutes a protective structure to be included in its containment systems. In the case of existing structures, the Metropole started from the original design criteria of the structures, to identify the areas that could be protected, and then to identify all the structures that contribute to the protection of this area. This process revealed a wide variety of structures:

- Protective structures that were already well identified and the focus of management efforts: low walls, stop logs on all openings, aqua barriers...;
- Ancillary structures whose management had never been coordinated with that of the retaining walls: classic contributory structures (infrastructure embankments, buildings, bridge piers), riprap and bank reinforcement.

This survey also highlighted a series of bypass points in the containment systems for which the Metropole had no information to assess their impact during floods: the crossing structures.

Within the framework of the EDD (hazard identification survey), all these ancillary structures, which until now had not been managed for flood protection purposes, became factors degrading the safety level of the containment systems. Nevertheless, the most critical issue remains the crossing structures, which represent numerous potential bypass points in the containment systems that the Metropole is currently unable to characterize and control.

In this context, the only solution found with the state authorities to maintain the authorization of the dikes within the containment systems is a limited liability authorization for the Metropole. The Metropole is obliged to undertake a large-scale project in the short term to improve knowledge about these structures.

In addition to these technical issues, the multiplicity of structures is compounded by the multiplicity of stakeholders involved in the operation of the protection systems. When the Metropole took over responsibility, it was necessary to organize the transition between the historical managers of the retaining walls, resulting in five different scenarios across the territory. In the years to come, the Metropole will need to establish agreements with all the network and structure managers involved, in order to guarantee the reliability of containment systems management.

Key Words

containment system, crossing structure, contributing structure,
management agreement, level of protection

L'aménagement hydraulique de la Bassée : un maillon essentiel de la prévention des crues en amont de l'Ile-de-France

La Bassée Hydraulic Scheme: a major milestone for flood protection of the Ile-de-France region

O. Clave¹, B. Cortier¹, P. Laugier²

¹ Setec hydratec, Paris, France, odile.clave@setec.com

² EPTB Seine Grands Lacs, Paris, France, pascal.lauquier@seinegrandslacs.fr

Résumé

Les travaux pour l'aménagement d'un site pilote de stockage des crues de Seine en amont de la confluence de la Seine avec l'Yonne, ont démarré en 2022. Ce nouvel aménagement sera structurant pour la protection de l'Ile-de-France contre les inondations de la Seine.

Il complétera l'actuel dispositif de protection reposant sur les 4 barrages réservoirs amont gérés par l'Etablissement Public de Bassin (EPTB) Seine Grands Lacs (Marne, Aube, Seine, et Pannecière).

L'aménagement localisé à la confluence de la Seine et de son principal affluent, l'Yonne, permettra le stockage d'une fraction du volume de crue lors de l'arrivée de la pointe de cet affluent qui conditionne l'importance de la crue en aval de la confluence. En effet, les crues dommageables dans l'agglomération parisienne proviennent en grande partie de la conjugaison des crues de l'Yonne et de la Seine (à Montereau-Fault-Yonne).

Porté par Seine Grands Lacs, le projet Seine Bassée a pour objectif, dans sa configuration complète (9 espaces endigués, dont celui du Site pilote), de stocker 55 Mm³ d'eau lors du passage des crues de l'Yonne. L'article présente en détail le fonctionnement hydraulique de cet aménagement qui diffère de celui des barrages réservoirs, y compris par le caractère innovant du stockage dynamique dans la nappe. Les points particuliers de la conception des digues du site pilote en construction seront ensuite présentés : optimisation des volumes de matériaux, et intégration paysagère et environnementale, conception résistante à l'aléa de franchissement par les vagues.

Mots-clés

stockage des crues, digues, hydrogéologie, franchissement

Abstract

Works for the first step of flood storage system upstream of the Seine started in 2022. This new scheme is a major milestone pour the Ile-de-France region flood protection.

It will complete the present protection system that includes 4 storage dams in the upstream catchment area of the Seine. These dams are operated by the Etablissement Public de Bassin (EPTB) Seine Grands Lacs (Marne, Aube, Seine, and Pannecière).

This new scheme is located at the Seine and Yonne confluence. It will store a fraction of the flood volume when the peak of the Yonne flood is coming. The floods that create damages in the Parisien region come in large part for the addition of the Seine and Yonne floods.

Handled by Seine Grand Lacs, the Seine Bassée project aims, in its final configuration 9 storage area included the “site pilote”), at storing 55 Mm³ of water during Yonne flood.

The article presents in details the hydraulic operation of the scheme which differs from existing storage dams. It will present also the underground storage and hydrogeological behavior. Then, some particularities of the dykes design are presented: volume optimization, environment integration and overflow design.

Key Words

flood protection, flood storage, dykes, hydrogeology, overflow

Aménagement hydraulique de la Savoureuse, singulier par sa gestion et son fonctionnement

The Savoureuse hydraulic system, unique in its management and operation

E. Remy¹, A. Salmi¹, S. Vernier², M. Talhouarn²

¹ ISL Ingénierie, Lyon, France, remy@isl.fr

² Département du Territoire de Belfort, Belfort, France,
stephanie.vernier@territoiredebelfort.fr

Résumé

Le Département du Territoire de Belfort est le propriétaire, le gestionnaire et l'exploitant d'un aménagement hydraulique atypique par son fonctionnement, l'ampleur des ouvrages le composant et leur implantation géographique. Il se compose de bassins écrêteurs de crues, implantés en série hors de l'emprise du lit mineur des cours d'eau, le long de la Savoureuse (série de bassins de Chauv et de Sermamagny) et de la Rosemontoise (série de bassins de Grosagny) pour un total de 8 bassins écrêteurs.

Les bassins écrêteurs de crues ont été conçus pour qu'ensemble, ils atténuent l'impact des crues hivernales de la Savoureuse et de la Rosemontoise (liées à des épisodes pluviaux associés à la fonte des neiges) sur l'aire urbaine de Belfort-Montbéliard.

Les 3 séries de bassins présentent toutes la même constitution :

- Une prise d'eau latérale au cours d'eau comprenant une digue de fermeture de la vallée, une passe et un clapet, s'abaissant à partir d'un certain niveau d'eau atteint dans le cours d'eau, et de dalots équipés de grilles et d'un pare-embâcle, permettant de limiter les débits prélevés en cas de crue extrême. Des vannes de sectionnement permettent d'isoler les bassins hors période de mise en service de l'aménagement hydraulique.
- Un chenal d'amenée situé en sortie de l'ouvrage de prise d'eau, ayant pour objectif de conduire l'eau de cet ouvrage jusqu'au bassin amont.
- Des bassins, hors emprise du lit mineur, délimités par des digues en remblais zonés qui se remplissent en série par l'intermédiaire de déversoirs à surface libre.
- Chaque bassin est équipé d'une conduite de fond permettant notamment de vidanger les bassins à la décrue ou en cas de nécessité de mise en sécurité de l'ouvrage en cours de remplissage.

Le fonctionnement hydraulique est atypique avec un aménagement placé en dérivation de cours d'eau et entrant en service, c'est-à-dire servant à l'écrêtement des crues, uniquement entre le 15 novembre et le 15 mars. En dehors de cette période, les vannes de sectionnement de chaque prise d'eau sont fermées, les ouvrages ne servent pas à l'écrêtement des crues.

Compte tenu de la complexité du système et d'un fonctionnement qui n'est pas totalement passif, l'étude de dangers s'est avérée complexe avec une multitude de scénarios à étudier.

Mots-clés

aménagement hydraulique, dérivation, asservissement, bassins écrêteurs de crue

Abstract

Territoire de Belfort Department is the owner, manager and operator of an atypical hydraulic system in terms of operation, scale of the structures and geographical location. It is composed of a series of flood control reservoirs located outside of the Savoureuse riverbed (series of reservoirs at Chaux and Sermamagny) and outside of the Rosemontoise riverbed (series of reservoirs at Grosagny), for a total of 8 flood control reservoirs.

The flood control reservoirs are designed to reduce the impact of winter flooding on the urban area of Belfort-Montbéliard from the Savoureuse and Rosemontoise rivers (floods linked to rainfall events associated with snowmelt).

The 3 series of reservoirs all have the same structure:

- A lateral water intake on the side of the watercourse, including a dike to close the valley perpendicularly to the river, a bypass and a flap gate, lowered once a certain water level is reached in the watercourse, and culverts equipped with grids and an anti-jam device, to limit the deviated flows in case of extreme flooding event. Segment gates isolate the reservoirs when the hydraulic system is not in operation.
- An inlet channel located just downstream the water intake structure, designed to convey water from the intake to the upstream reservoir.
- Reservoirs, located outside of the riverbed, bounded by zoned embankment dikes filling up in series via free-surface weirs.
- Each reservoir is equipped with a bottom pipe, enabling the drawdown of the reservoirs when the water level decreases or for safety request during the filling phase.

The atypical hydraulic operation is as follows:

- The hydraulic system is only in operation between November 15 and March 15 during the winter period favorable to large-scale flooding (rainfall and snowmelt). Outside this period of time, the segment gates of each water intake are closed, and the structures are not used for flood control;
- During the winter period, the segment gates are opened, and part of river flow is deviated once the intake flap gates are lowered, for predefined water levels. The flow deviated is controlled by the culverts' sections. As soon as the reservoirs are full, the gates are closed again.

Given the complexity of the system, and the fact that the system is not totally passive, the hazard study was proved to be complex, with a multitude of scenarios to study.

Key Words

hydraulic engineering, diversion, servicing, flood control basins

Digues résistantes à la surverse dans les zones d'inondation contrôlées
dans le bassin versant de l'Escaut maritime
en Flandre (Belgique), et perspectives pour la France

*Dikes resistant to overflow in controlled flood areas in the tidal river
Scheldt basin in Flanders (Belgium),
and opportunities for France*

**P. Van Bockstal¹, M. De Beukelaer-Dossche¹, S. Nollet¹,
P. Peeters², J. Vercruyse², N. Nerinx³**

¹ De Vlaamse Waterweg nv, Division Région Centrale, Anvers, Belgique,
patrick.vanbockstal@vlaamsewaterweg.be

² Flanders Hydraulics, Anvers, Belgique, patrik.peeters@mow.vlaanderen.be

³ ISL Ingénierie, Paris, France, nerinx@isl.fr

Résumé

L'Escaut maritime en Flandre et ses affluents sont caractérisés par des marées d'une amplitude de 5 à 6 mètres par temps calme, et atteignant 7,5 mètres lors des marées de tempête. Après des inondations en 1953 et 1976, le plan « Sigma », approuvé en 1977, prévoyait le rehaussement des digues et la création de zones d'inondation contrôlées pour défendre les zones à risque. Chaque zone d'inondation contient 4 éléments essentiels : 1) une nouvelle digue d'encercllement délimitant la zone inondable, 2) la zone d'inondation en soi, 3) la digue d'origine abaissée et transformée en digue déversante résistante à la surverse et 4) un ouvrage de vidange de la zone.

En 2005, le plan Sigma fut actualisé et amélioré, ajoutant comme but supplémentaire de créer dans de nouvelles zones d'inondation contrôlées des estrans vaseux avec des slikke et des schorre, biotopes humides typiques, devenus rares dans le bassin de l'Escaut. La zone appelée « Polders de Kruikebe » est la plus grande, avec une superficie de 692 ha et une digue déversante de 6,6 km de long. Grâce à un ouvrage d'entrée et leur remplissage partiel biquotidien au rythme de la marée, ces polders apportent une forte plus-value environnementale à l'écosystème de l'Escaut.

Les digues déversantes réalisées ces dernières décennies dans le cadre du plan Sigma sont caractérisées par un talus à pente faible côté terre dotée d'un revêtement en enrobé drainant renforcé avec des fibres, recouvert d'une couche de terre argileuse permettant le développement d'une végétation herbeuse résistant relativement bien à la surverse.

Les digues déversantes des Polders de Kruikebe et d'autres zones d'inondation contrôlées ont ensemble été mobilisées à des centaines de reprises, permettant d'obtenir un retour d'expérience du fonctionnement d'un tel ouvrage, en termes de sollicitations hydrauliques et de comportement des digues et des dispositifs de protection contre l'érosion. Cet article présente le concept et la construction des digues résistantes à la surverse réalisées dans le cadre du plan Sigma ainsi que le retour d'expérience sur le comportement des ouvrages lors des marées de tempête. Il propose également des perspectives d'application pour la France. Il sera en particulier discuté comment la résistance à la surverse peut contribuer à concevoir des systèmes d'endiguements acceptables d'un point de vue socio-économique et technique.

Mots-clés

digues résistantes à la surverse, zones d'inondation contrôlées, Escaut, enrobé drainant, Sigmaplan

Abstract

The Sea Scheldt and its tributaries in Flanders are characterised by tides with amplitudes from 5 to 6 metres during calm weather, and up to 7,5 meters during storm tides. Due to floods in 1953 and 1976 the Sigma plan, approved in 1977, envisaged the elevation of the dikes and the creation of controlled flood areas to protect the endangered zones. Each controlled flood area contains 4 essential elements: 1) a new circular dike which confines the floodable area, 2) the flood area itself, 3) the original river dike, lowered and transformed into a dike that is resistant to overflow and 4) an engineering structure to empty the flood area.

In 2005, the Sigma plan was brought up to date and improved, adding as an additional goal to create tidal marshes in new flood areas, since these habitats had become rare in the Scheldt basin. The zone called "Polders of Kruikebe" is the largest flood area, having a surface of 692 ha and an overflow dike that is 6.6 km in length. Thanks to an inlet structure and the partial filling of the flood area twice a day on the rhythm of the tides, these polders create a huge environmental added value to the ecosystem of the Scheldt.

The overflow dikes that have been realised within the scope of the Sigma plan these last decades, all have a weak slope on the land side that is covered with open stone asphalt and a layer of loamy sand permitting to develop a herbal vegetation that resists to overflow rather well.

The overflow dikes of the Polders of Kruikebe and of other controlled flood areas have together endured hundreds of overflows, permitting to report on the functioning of those engineering structures in terms of hydraulic load and on the behaviour of the dikes and their facilities protecting against erosion. This article presents the concept and the construction of the resistant overflow dikes that have been constructed in the scope of the Sigma plan, and the experiences on the behaviour of these dikes during storm tides. It also proposes some application opportunities in France. In particular the way how the resistance to overflow can contribute to conceiving flood protection systems from the socio-economical and technical point of view will be discussed.

Key Words

dikes resisting to overflow, controlled flood areas, Scheldt, open stone asphalt, Sigma plan

Retour d'expérience de la gestion de la crue de février 2021 en Loire aval

Feedback on the management of the February 2021 flood in the lower Loire

V. Gaspari¹, J. Havot Broekarts², S. Dieudonné³

¹ Établissement public Loire, Angers, France, virginie.gaspari@eptb-loire.fr

² Établissement public Loire, Angers, France, julien.havot@eptb-loire.fr

³ Établissement public Loire, Angers, France, simon.dieudonne@eptb-loire.fr

Résumé

À l'été 2019, quatre intercommunalités du Maine-et-Loire ont délégué la gestion de leurs digues non domaniales à l'Établissement public Loire (EP Loire). Les 52 km de digues concernées sont principalement des ouvrages anciens, dont seules les premières obligations réglementaires, comme l'étude de dangers ou la visite technique approfondie, avaient été réalisées avec l'appui-technique de l'EP Loire. Après une année et demi de gestion de ces ouvrages, le travail réalisé en étroite concertation et collaboration avec les collectivités a permis l'élaboration des documents d'organisation et de consignes de gestion des ouvrages, l'organisation d'une première formation des agents des collectivités chargées de la surveillance en crue, le recensement des entreprises de travaux mobilisables pour intervenir en urgence ou encore la mise en place d'un dispositif d'astreinte d'exploitation.

Or, il se trouve que les collectivités et l'EP Loire ont eu très vite l'occasion de mettre en application ce dispositif organisationnel en faisant face à une situation de crue au début de l'année 2021. Cette crue, d'intensité faible, mais légèrement supérieure aux niveaux de protection de plusieurs ouvrages, a conduit au déclenchement des niveaux d'alerte et de surveillance des ouvrages et permis la détection de désordres graves sur les digues du Petit Louet et de Montjean-sur-Loire. L'organisation de la communication entre l'EP Loire, les collectivités concernées et la Préfecture a ainsi été très vite mise à l'épreuve. La mise en œuvre de travaux d'urgence le 4 février sur la digue du Petit Louet, puis une décision d'évacuation préventive d'une partie de la population, ont intensifié les échanges entre les collectivités, et les prises de décisions. Peu après, le samedi 6, les agents de surveillance repèrent sur la digue de Montjean des premiers signes de fuites au débit croissant. L'agent technique de l'EP Loire, sollicité, se rend sur site le dimanche 7. Dans l'après-midi, des travaux d'urgence sont décidés avec l'intervention d'urgence d'une entreprise locale via un arrêté de réquisition de la commune.

Le retour d'expérience réalisé suite à cet événement montre que l'ensemble des acteurs impliqués dans la gestion de crue a joué son rôle et que les procédures d'alerte, d'intervention et de transmission de l'information étaient globalement bien adaptées à cette situation de crise. Néanmoins, s'agissant d'une première mise en situation de l'organisation de gestion en crue, des axes d'amélioration ont été relevés et des actions correctrices ont été mises en œuvre ou programmées. Ce retour d'expérience a ainsi permis de consolider les circuits de transmission de l'information entre les différents acteurs intervenant dans la gestion de la crue, d'ajuster les documents d'organisation et de consignes de gestion des ouvrages, de réadapter les formations des agents de la surveillance en crue suivant un format plus adapté

et de programmer d'autres actions visant à renforcer et rendre plus efficient le dispositif organisationnel en crue.

Mots-clés

retour d'expérience, gestion du risque de crue, Loire, désordres, travaux d'urgence

Abstract

In summer 2019, four local authorities in Maine-et-Loire delegated the management of their non-state dykes to the Loire River Basin Authority (EPL). The 52 km of dykes concerned are mainly old infrastructures, for which only the first regulatory obligations had been carried out with the EPL's technical support. After a year and a half of managing these structures, the work carried out in close consultation and collaboration with the local authorities has led to; the drafting of organisational documents and instructions for managing the structures, permitted the organisation of initial training for local authority staff responsible for flood monitoring and led to the identification of construction companies that can be mobilised to intervene during an emergency, and the setting up of an on-call operating system.

However, the local authorities and the EPL quickly had the opportunity to apply this organisational system by dealing with a flood situation, at the beginning of 2021. This flood, which was of low intensity but slightly higher than the protection levels of several structures, triggered the alert and monitoring levels for the structures and led to the detection of serious damage on the Petit Louet and Montjean-sur-Loire dykes. The organisation of communication between the EPL, the local authorities concerned and the Prefecture was quickly put to the test. The implementation of emergency works on the Petit Louet dyke on February 4th, followed by a decision to evacuate part of the population as a precautionary measure, intensified the exchange between the local authorities and the decision-making process. Shortly afterwards, on Saturday, February 6th, surveillance officers noticed the first signs of leaks on the Montjean levee, which were increasing in size. A technical officer from the EPL was called, and the latter went on site on Sunday, February 7th. Later in the afternoon, the decision was taken to carry out emergency works, involving a local company via a requisition order issued by the concerned municipality.

The feedback from this event shows that all those involved in flood management played their role. It equally implies that the alert, the response and the information transmission procedures were generally well adapted to this critical situation. Nevertheless, as this was an initial test of the flood management organisation, areas for improvement were identified and corrective actions were set up or planned. This feedback, therefore enabled us to consolidate the information transmission circuits between the various players involved in flood management, in order to adjust the organisational documents and instructions for managing the structures, to readapt the training of flood watch officers using a more appropriate format and to plan other actions aimed at strengthening and making more efficient the flood organisational system.

Key Words

feedback, flood risk management, Loire, disorders, emergency works

La sécurisation et le renforcement des digues du Rhône,
l'optimisation d'un projet à contraintes multiples
*Securing and reinforcing the Rhône levees,
optimising a project with multiple constraints*

A.S. Prost¹, J.L. Nuel², G. Chazelle³, C. Kanel⁴

¹ Tractebel Engineering, Nîmes, anne-sophie.prost@tractebel.engie.com

² Nîmes Métropole, Nîmes, fideline.sebileau@nimes-metropole.fr

³ Communauté de Communes Rhône-Vistre-Vidourle,
Gallargues-le-Montueux, gchazelle@ccrvv.fr

⁴ Établissement Public Territorial de Bassin Vistre Vistrenque, Caissargues,
caroline.kanel@vistre-vistrenque.fr

Résumé

Le Rhône, petit cours d'eau méditerranéen affluent du Vistre, est soumis aux précipitations intenses méditerranéennes et génère régulièrement des crues débordantes, notamment en octobre 1988, octobre 2014 et septembre 2021, à l'origine d'inondations des villages de Vergèze et Codognan dans le Gard (plus de 1 000 personnes exposées). Ce secteur fortement urbanisé est par ailleurs compartimenté transversalement par les remblais de l'autoroute A9, de la voie SNCF, de la RN113 et du canal Bas-Rhône-Languedoc.

La protection des zones urbanisées de Vergèze et de Codognan contre les débordements du Rhône est assurée actuellement par une digue en rive gauche de la rivière réalisée dans l'urgence suite à la crue historique de 1988. L'expertise de cet ouvrage a mis en évidence qu'il ne répond pas aux objectifs fonctionnels de protection des quartiers urbanisés, ni aux critères de sécurité requis pour les digues. Le remplacement de l'ouvrage et la construction des compléments nécessaires pour aboutir à un Système d'Endiguement cohérent ont donc été retenus en tant qu'action dans le PAPI 1 puis comme travaux dans le PAPI 3 Vistre. Une action de renaturation du lit du Rhône à visée écologique et paysagère est prévue en parallèle ; cette action jouera également un rôle dans la compensation des travaux d'endiguement.

La Communauté de Communes Rhône-Vistre-Vidourle, disposant de la compétence GEMAPI/Prévention des Inondations sur ce territoire, pilote donc le projet de sécurisation et renforcement des digues et renaturation du Rhône, en co-maîtrise d'ouvrage avec l'EPTB Vistre Vistrenque qui dispose de la compétence Gestion des Milieux Aquatiques. Après une première phase d'études menées jusqu'au niveau Projet, la maîtrise d'œuvre ainsi que la constitution des dossiers d'autorisation et la maîtrise foncière ont été confiées au groupement Tractebel-Riparia-Geofit Expert, avec pour mission d'optimiser la conception en tenant compte des contraintes techniques, financières, foncières, environnementales, hydrauliques, hydrogéologiques et des interfaces avec l'ensemble des parties prenantes du territoire.

Le projet, qui comprend un système d'endiguement d'une longueur d'environ 3 km et d'une hauteur maximale de 3,5 m, est actuellement en phase d'optimisation de la conception et d'établissement des dossiers réglementaires.

L'article présente :

- le contexte du projet et les contraintes auxquelles il est soumis ;
- la méthodologie mise en œuvre pour optimiser la conception ainsi que les sources d'optimisation explorées et finalement retenues ;
- le bilan de la démarche d'optimisation menée.

Mots-clés

PAPI, système d'endiguement, optimisation de projet sous fortes contraintes, renaturation

Abstract

The Rhône, a small Mediterranean river, is a tributary of the Vistre and is subject to intense Mediterranean precipitation, which regularly leads to overflowing floods. Notably, in October 1988, October 2014, and September 2021, these floods resulted in inundations of the villages of Vergèze and Codognan, with over 1,000 people exposed. This heavily urbanized area is also compartmentalized by the embankments of the A9 motorway, the railway track, the RN113, and the Bas-Rhône-Languedoc canal.

Currently, the protection of the urbanized areas of Vergèze and Codognan against the Rhône's overflow is provided by a levee on the left bank of the river, constructed after the historic flood of 1988. Former expertise on this structure has revealed that it does not meet the functional objectives of protecting urban areas, nor the safety criteria required for levees. Therefore, the reconstruction of the structure as a coherent Flood Protection System has been chosen. An ecological and hydraulical renaturation of the Rhône riverbed is also planned as compensation and in conjunction with the embankment works.

The Rhône Vistre Vidourle Community of Communes, which has the GEMAPI flood prevention competence in this area, is leading the project for the reinforcement of levees, in collaboration with the EPTB Vistre Vistrenque that manages the renaturation of the Rhône through their aquatic environments competence. After an initial phase of studies conducted up to the basic design level, the project management, authorization documentation, and land acquisition have been entrusted to the Tractebel-Riparia-Geofit Expert consortium, with the mission of optimizing the design while considering technical, financial, land, environmental, hydraulic, hydrogeological constraints, and interfaces with all stakeholders in the region.

The project, which includes an embankment system with a length of approximately 3 km and a maximum height of 3.5 m, is currently in the phase of optimizing the design and preparing regulatory documentation.

The presentation covers :

- the project context and the constraints it faces;
- the methodology employed to optimize the design, as well as the sources of optimization explored and ultimately chosen;
- the outcome of the optimization process.

Key Words

flood protection system, project optimization under constraints, renaturation

Quel niveau de performance pour un barrage multifonction, point d'entrée du système de protection aval contre les inondations ?
What performance level for a multi-purpose dam, the entry point to the downstream flood protection system?

C. Chene¹, E. Vuillermet², M. Trilla³

¹ BRL ingénierie, Nîmes, France, chloe.chene@brl.fr

² BRL ingénierie, Nîmes, France, eric-vuillermet@brl.fr

³ Département des Pyrénées Orientales, Perpignan, France, maqali.rouge@cd66.fr

Résumé

Le système de protection contre les inondations sur la partie aval de la Têt, fleuve des Pyrénées Orientales (France), est composé du barrage de Vinça et d'un système d'endiguement. La particularité de ce système est qu'il est partagé entre deux entités au titre de la séparation des compétences des maîtres d'ouvrage. Le premier, le barrage, relève de la responsabilité du Conseil Départemental, pour assurer les 2 fonctions de l'ouvrage: la gestion de la ressource en eau (soutien à l'étiage et irrigation) et l'écrêtement des crues. Le second, le système d'endiguement, est géré par la collectivité locale en charge de la compétence GEMAPI (Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations), le syndicat mixte de la Têt-Bassin Versant (SMTBV). Dans ce découpage, le Conseil Département doit s'engager sur la performance hydraulique de son ouvrage vis-à-vis de l'écrêtement des crues, données d'entrée nécessaires à la définition du niveau de protection aval.

Les performances de laminage du barrage ont été évaluées au travers d'une étude sur le fonctionnement hydraulique du barrage et au travers de l'étude de dangers aménagement hydraulique du barrage. Cette tâche s'est avérée complexe, compte tenu :

- des fonctionnalités antagonistes du barrage : gestion de la ressource en eau et écrêtement des crues. En effet, la première encourage une retenue pleine quand la deuxième tend à favoriser une retenue vide ;
- des caprices de l'hydrologie, conduisant à des incertitudes dans l'évaluation de l'occurrence des événements et à des variations de forme des hydrogrammes testés ;
- des contraintes de gestion hydraulique du barrage, limitées par les capacités techniques des organes d'évacuation vannés et par les modalités d'exploitation de l'ouvrage.

Les études concluent sur une multitude de scénarios possibles dans lesquels le taux de laminage du barrage varie de 0 à plus de 50 %. Fort de ce constat, la difficulté réside dans la manière de définir un engagement numérique réaliste sur la performance d'écrêtement du barrage vis-à-vis de l'aménagement aval.

Mots-clés

engagement, performance hydraulique, étude de dangers, aménagement hydraulique, laminage

Abstract

The flood protection system on the downstream section of the Têt, a river in the Pyrénées Orientales (France), consists of the Vinça dam and a system of levees. The particularity of this system is that it is shared between two entities, in line with the division of responsibilities between the project owners. The first, the dam, is the responsibility of the Conseil Départemental, as one of its primary functions and uses is water resources management (flood control and irrigation). The second, the levees system, is managed by the local authority in charge of GEMAPI (aquatic environment management and flood prevention), the syndicat mixte de la Têt (SMTBV). The Conseil Départemental has an obligation to guarantee the hydraulic performance of the dam in terms of flood control in relation to the downstream levees and this is the input data needed to define the level of downstream protection.

The flood control performance of the dam was assessed through a study of its hydraulic operations and a risk assessment of the hydraulic design. This proved to be a complex task, given that:

- The dam has opposing functions: water resource management and flood control. At first sight, these two functions are antagonistic: the former favours a full reservoir, the latter an empty one.
- The vagaries of hydrology lead to uncertainties in assessing the occurrence of events and variations in the shape of the hydrographs studied.
- Constraints on the hydraulic management of the dam, which are limited by the technical capacity of the sluice gates and the operating conditions of the structure.

The studies conclude that there is a wide range of possible scenarios in which the capping rate varies from 0 to over 50%. Given this observation, the difficulty lies in defining a realistic commitment to the flood control performance of the dam in relation to the downstream levees system.

Key Words

commitment, hydraulic performance, risk assessment, hydraulic design, rolling mills

**Optimisation du système de protection
du collège de Saint-Sauveur-sur-Tinée**
*Optimization of the levee system protecting the secondary school
of Saint-Sauveur-sur-Tinée from flooding*

B. Renaudineau¹, W. Martinez², P. Richert³, N. Rosin-Corre⁴

¹ Tractebel Engineering, Lyon, barbara.renaudineau@tractebel.engie.com

² SMIAGE Maralpin, Nice, w.martinez@smiage.fr

³ Tractebel Engineering, Nice, pascale.richert@tractebel.engie.com

⁴ Tractebel Engineering, Lyon, nathalie.rosin-corre@tractebel.engie.com

Résumé

Au droit de la traversée de Saint-Sauveur-sur-Tinée, la Tinée, rivière au régime torrentiel, a un parcours sinueux contraint par les aménagements successifs des berges. Ce cours d'eau montagnard est soumis à des crues régulières qui font évoluer significativement le fond du lit sous l'effet du transport solide. Le quartier Saint-Blaise qui héberge le collège du même nom est situé en zone d'aléa fort inondation.

Le PPRI impose au Département des Alpes-Maritimes de réaliser les études et travaux de sécurisation du collège contre les crues. Le SMIAGE Maralpin a une délégation de Maîtrise d'Ouvrage pour ce projet dont le programme est le suivant :

- la démolition du pont-route existant et la construction d'un ouvrage neuf de franchissement, de section hydraulique plus importante ;
- la reprise du système d'endiguement le long du collège sur environ 200 m avec la réalisation d'un mur résistant à la surverse ;
- la reprise de l'entonnement amont du pont ;
- l'aménagement des ouvrages d'évacuation des eaux pluviales existants avec la mise en place de dispositifs anti-retour.

Ce projet a fait l'objet de diverses études hydrauliques (avec modélisations 1D et 2D) afin de définir plus précisément les aménagements du programme. Ces modélisations ont permis de mieux appréhender le fonctionnement hydraulique de la zone d'étude et d'optimiser les aménagements à réaliser :

- la démolition / reconstruction du pont améliore notablement l'écoulement en crue de la Tinée ;
- le mur d'endiguement le long du collège protège celui-ci pour une crue de période de retour 80 ans et résiste à la surverse pour les crues plus importantes.

Les aménagements à réaliser sont constitués des différents ouvrages indépendants qui contribuent chacun à l'amélioration des écoulements et donc à la réduction du risque inondation du collège.

En conclusion, des études hydrauliques de complexité croissante se sont avérées nécessaires pour la définition et l'optimisation des aménagements à réaliser pour la sécurisation du collège Saint-Blaise.

Mots-clés

optimisation d'un système d'endiguement existant, modélisation hydraulique bidimensionnelle, transport solide

Abstract

As the Tinée, a torrential river, flows through Saint-Sauveur-sur-Tinée, the Tinée, it displays a winding course constrained by the evolving development of its banks. This mountain stream is subject to regular flooding, which causes the bed to change significantly as a result of solid transport. The Saint-Blaise district, home to the secondary school of the same name, is located in a high flood hazard zone.

The PPRI (flood prevention plan) requires the Alpes-Maritimes département to carry out studies and works to protect the school from flooding. The SMIAGE Maralpin has been delegated to manage the project, according to the following programme:

- Demolition of the existing road bridge and construction of a new crossing structure with a larger hydraulic cross-section;
- Restoration of the levee system along the school over a distance of around 200 m, with the construction of an overflow-resistant floodwall;
- Restoration of the upstream bridge culvert;
- Upgrading the existing stormwater drainage structures by installing backflow prevention devices.

Various hydraulic studies with 1D and 2D modelling have been performed in order to define more precisely the programme's components. These models have provided a better understanding of the hydraulic behaviour of the study area and allowed the following optimized designs:

- The demolition/reconstruction of the bridge will significantly improve the Tinée's flow under flood conditions.
- The floodwall along the school protects it against an 80-year flood and resists overtopping for higher floods.

The works to be carried out consist of various independent structures, each of which contributes to improving the flow of water and thus reducing the risk of flooding the school.

In conclusion, hydraulic studies of increasing complexity were necessary to define and optimize the works to be carried out to make Saint-Blaise secondary school safer.

Key Words

optimization of an existing levee system, 2D hydraulic modelling, sediment transport

L'Isère à l'amont de Grenoble : modalités de gestion du transport solide pour assurer sur le long terme le maintien du niveau de protection des zones protégées

River Isère upstream from Grenoble: solid transport management methods to ensure long-term protection of protected areas

**D. Kuss¹, J.-L. Body², M. Pinhas¹, V. Kouliniski³,
A. Merlo³, D. Verdeil¹, J. Henry¹, D. Milleret⁴**

¹ Syndicat Mixte des Bassins hydrauliques de l'Isère, Grenoble, France, damien.kuss@symbhi.fr

² JL BODY Ingénieur Conseil, St-Jean d'Arvey, France, jl.body@yahoo.fr

³ ETRM, Les chapelles, France, etrm@cegetel.net

⁴ Isère Aménagement, Grenoble, France, d.milleret@elegia-group.fr

Résumé

Le maintien sur le long terme du niveau de protection défini par le gestionnaire d'un système d'endiguement suppose une stabilité temporelle de la performance des ouvrages intégrés au système vis-à-vis des différents modes de défaillance identifiés. En contexte fluvial, avec de faibles pentes longitudinales et un transport solide par charriage modéré, on peut ainsi être amené à faire l'hypothèse d'invariance sur le long terme des fonds et donc à résumer le problème à la stabilité de la résistance structurelle des ouvrages.

L'exemple de l'Isère à l'amont de Grenoble, à travers la réalisation du projet intégré de protection contre les crues « Isère amont », illustre pourtant la nécessité d'organiser de manière conjointe la surveillance des ouvrages du système de protection et celle de l'évolution du lit (évolution longitudinale et en plan).

Le projet Isère amont a été mis en œuvre par le Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère (SYMBHI) entre 2012 et 2023. 135 millions d'euros ont été investis par l'État et les collectivités territoriales pour la protection de plus de 300 000 habitants. Le projet a été conçu avec un niveau de protection bicentennal. La stratégie de protection repose en grande partie sur l'écroulement des crues en amont de l'agglomération grenobloise avec le remplissage de 16 « champs d'inondation contrôlée ». Garantir en permanence la fonctionnalité des ouvrages de déversement impose donc de stabiliser le profil en long au niveau défini dans les études de conception. Or, celui-ci est marqué par une décroissance forte de la pente longitudinale et donc de l'énergie disponible pour le transport solide par charriage avec des dépôts annuels pouvant atteindre jusqu'à 100 000 m³/an. Par ailleurs, le transit de matières fines en suspension peut également contribuer à l'exhaussement du lit par dépôt sur les bancs.

Le SYMBHI expose dans cette communication les modalités de gestion sédimentaire qu'il va mettre en œuvre. Ces procédures sont mises en perspective au regard d'une description préalable des aménagements réalisés, du contexte géomorphologique, de l'historique de gestion du cours d'eau, d'une synthèse d'analyses diachroniques de profils en long et de bilans sédimentaires effectués à partir de bathymétries successives entre la fin du XIX^e siècle et 2020.

Elles comprennent 2 volets : (1) protocole de suivi du lit avec campagnes bathymétriques, suivi du fil d'eau d'étiage et modélisations hydrauliques ; (2) définition de modalités de curage au

droit de deux plages de dépôt, mais aussi si besoin sur l'ensemble du linéaire géré (environ 50 km).

Mots-clés

projet Isère amont, Isère, digues, transport solide, charriage

Abstract

Maintaining the level of protection defined by the manager of a diking system over the long term presupposes temporal stability in the performance of the structures integrated into the system with regard to the various failure modes identified. In a river context, with low longitudinal gradients and moderate sediment bedload transport, we may be led to assume long-term invariance of the river bed, and thus to reduce the problem to the stability of the structural resistance of the structures.

However, the example of the Isère river and the "Isère amont" integrated flood protection project illustrate the need to organize joint monitoring of the protection system's structures and the bed's evolution (longitudinal and in plan).

The Isère amont project was implemented by SYMBHI (Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère) between 2012 and 2023. A total of €135 million has been invested by the French government and local authorities to protect over 300,000 inhabitants. The project has been designed with a bicentennial level of protection in mind. The protection strategy is largely based on flood control upstream of the Grenoble conurbation, with the filling of 16 "controlled flooding fields". To guarantee the continued functionality of the overflow structures, the longitudinal profile must be stabilized at the level defined in the design studies. However, the latter is marked by a sharp decrease in longitudinal gradient and thus in the energy available for solid transport by scouring, with annual deposits of up to 100,000 m³/year. In addition, the transit of fine suspended matter can also contribute to bed heightening through deposition on the banks.

In this communication, SYMBHI sets out the sediment management procedures it will be implementing. These procedures are put into perspective with regard to a preliminary description of the developments carried out, the geomorphological context, the management history of the watercourse, and a synthesis of diachronic analyses of longitudinal profiles and sediment balances carried out on the basis of successive bathymetries between the end of the 19th century and 2020. They comprise 2 parts: (1) a bed monitoring protocol with bathymetric campaigns, low-water level monitoring and hydraulic modelling; (2) definition of cleaning procedures at two deposition beaches, but also, if necessary, along the entire managed stretch (around 50 km).

Key Words

Isere amont project, Isere river, Dykes, Sediment transport, Bedload transport

**Travaux de reprise du système d'endiguement de Mindin
à Saint-Brévin-Les-Pins à l'embouchure de la Loire**
*Restoration works on the Mindin to Saint-Brévin-Les-Pins levee system
at the mouth of the Loire river*

T. Noblet¹, J. Le Davadic²

¹ ISL INGENIERIE, Nantes, France, noblet@isl.fr

² Communauté de Communes Sud Estuaire, Paimboeuf, France,
j.ledavadic@cc-sudestuaire.fr

Résumé

Le Système d'Endiguement de Mindin est situé sur la commune de Saint-Brévin-Les-Pins (44) et a pour principale vocation la protection de l'EPSM « Le Littoral » (Etablissement Public Médico-Social) sur une longueur de 1 115 m. Cet établissement a une capacité d'accueil d'environ 350 personnes en situation d'Handicap. En cas d'évènement majeur l'évacuation de l'établissement est extrêmement délicate. Le SE se referme sur sa partie Ouest sur le remblai d'accès au pont de Saint Nazaire. Dans ce contexte singulier et à fort enjeux, des travaux de confortement ont été planifiés par le GEMAPIEN (Communauté Commune Sud Estuaire) à partir de 2021 pour un montant d'environ 1 M€ TTC.

Les principaux objectifs de l'article sont : de détailler la méthodologie employée pour définir un niveau de protection en adéquation avec les contraintes fluvio-maritimes propres à l'estuaire de la Loire, de présenter les solutions techniques retenues pour conforter l'ouvrage existant puis exposer les différentes contraintes observées en phase chantier.

La définition du niveau de protection définitif de l'ouvrage a fait l'objet de nombreuses discussions avec les différents acteurs du projet : le GEMAPIEN (CCSE), la DREAL Pays de la Loire et la DDTM 44. La difficulté principale réside dans la définition des hauteurs de houle dans l'embouchure de la Loire. Le niveau retenu est finalement le résultat de plusieurs combinaisons entre niveau marin statique et dynamique.

Les protections mises en œuvre sur les différents tronçons sont principalement de deux natures en fonction des tronçons : reprise complète de la berge (enrochements libres et mur de protection en tête) ou ajout d'une nouvelle protection externe côté Loire.

Les travaux sont programmés entre juin et octobre 2023, période la plus favorable vis-à-vis de l'aléa météorologique. Les difficultés de réalisation des travaux résident principalement dans les conditions d'accès à l'estran du fait de la non-accessibilité du côté protégé. En effet l'EPSM est une enceinte complètement fermée dont l'accès est totalement prohibé pour des raisons de sécurité des travailleurs.

À la vue des enjeux, environ 1 800 personnes situées dans la zone protégée, la protection doit impérativement être assurée en période de travaux, pour cela les cadences des entreprises ont été bornées et des systèmes de protection temporaires sont stockés sur le site pour pallier rapidement à la formation d'une éventuelle brèche.

Mots-clés

système d'endiguement, Loire, estuaire, maritime

Abstract

The Mindin diking system is located in the commune of Saint-Brévin-Les-Pins (44). Its main purpose is to protect the EPSM "Le Littoral" (Medico-Social Public Establishment) over a span of 1,115 m. This establishment can accommodate around 350 patients with disabilities. In the event of a major incident, the evacuation the establishment is extremely delicate. The western extremity of the diking system shuts onto the embankment that leads to to the Saint Nazaire bridge. In this unique and high-stakes context, reinforcement works have been programmed by Communauté Commune Sud Estuaire (CCSE) starting from 2021, at a cost of around 1 M€ including tax. The main objectives of this article are to outline the methodology used to establish a protection level in line with the fluvio-maritime constraints that are specific to the Loire estuary, to present the technical solutions chosen to reinforce the existing structures and to highlight the various constraints observed during the works phase. The definition of the structure's final protection level was the subject of numerous discussions with the various parties involved in the project: the CCSE, the DREAL Pays de la Loire and the DDTM 44. The main difficulty lies in the wave heights' definition at the mouth of the Loire. In the end, the chosen level was the result of several combinations of static and dynamic sea levels. There are two main types of protection depending on the section: a complete renovation of the riverbank (rockfill armour and protective seawalls at the crest of the bank) or an addition of new external protection on the Loire side. The works are scheduled to take place between June and October 2023, the most suitable period in terms of climatic hazards. The main difficulty in carrying out the works will be the access to the foreshore, seeing as access from the protected area will be restricted. The EPSM is in fact a completely enclosed estate, to which the access is totally prohibited for the workers' safety. In view of the 1,800 people located within the protected zone, it is imperative that the protection be ensured during the construction period. To this end, the contractors' production rates have been limited and temporary protection systems have been stockpiled on the site to provide a rapid response in the event of a breach.

Key Words

diking system, Loire, estuary, maritime

Retour d'expérience de 12 années de travaux d'entretiens sur les digues de l'Agly maritime

Feedback from 12 years of maintenance work on the dykes of Agly maritime

P. Soulat¹, F. Nicoleau²

¹ Safege/Suez Consulting, Montpellier, France, patrick.soulat@suez.com

² Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly (SMBVA),
Saint Paul de Fenouillet, France

Résumé

Le Conseil Général des Pyrénées-Orientales est propriétaire de près de 27 km de digues de protection contre les inondations bordant les 13,2 derniers kilomètres du fleuve côtier Agly, depuis le pont de la RD900 jusqu'à la mer. Réalisées entre 1969 et 1974, ces digues protègent la plaine de la Salanque contre les inondations, soit une population permanente de 20 000 habitants s'élevant à 65 000 habitants en saison touristique.

Le Département a assuré la gestion de cet ouvrage entre 2007 et 2020. Depuis 2020 le Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly a repris la gestion des digues dans le cadre de la loi GEMAPI.

Un diagnostic approfondi de l'endiguement réalisé en 2010 et 2011 a conclu que la digue n'était pas suffisamment sûre. Afin de remédier durablement à cette situation, dans le cadre du diagnostic, un programme global de sécurisation de l'ouvrage a été élaboré. Ce programme se décline en 2 temps :

- de 2011 jusqu'à la reconstruction des digues, un programme de « travaux prioritaires »,
- au-delà, un programme de reconstruction des digues 30 m en retrait (8 à 10 ans de travaux pour un montant estimatif de 50 M€). Il consiste :
 - sur le tronçon situé entre le pont de la RD900 à Rivesaltes et le pont de la RD1 à Clair, à reconstruire les digues en recul de 30 m par rapport aux digues actuelles et à créer un ouvrage résistant à la surverse (déversoir) en rive droite.
 - Sur les zones situées entre la RD1 et la mer, à reculer les digues lorsque cela est possible (contraintes foncières, techniques) ou de les reconstruire ou conforter en place.

Il est à noter que sur les 13,2 km entre le pont de la RD900 et la mer, il n'existe actuellement pas de tronçon de digue résistant à la surverse. Ainsi, les crues de plein bord, engendrent un risque de rupture très élevé.

L'objectif du programme de travaux prioritaires est de remédier aux principaux désordres relevés sur les digues lors des « Visites Techniques Approfondies » réglementaires (inspections détaillées de l'endiguement), ou des visites de routine.

Depuis 2011, SAFEGE est en charge de la maîtrise d'œuvre des travaux d'entretien (travaux prioritaires) sur les digues. Ainsi depuis 2011, des travaux d'entretien ont été réalisés chaque année.

L'article présente le retour d'expérience de ces 12 années, qui ont vu :

- un changement de gestionnaire : continuité de gestion ;
- réalisation de travaux variés qui ont dû s'adapter à l'évolution des désordres d'année en année : terriers de blaireaux et de lapins, érosions de berges, érosion interne, fontis, canalisations traversantes, techniques végétales... ;
- 3 crues de plein bord ont eu lieu (2013, 2014 et 2020) dont les travaux de remise en état ont fait partie des travaux d'entretien.
- l'évolution du projet de sécurisation (projet global de reconstruction de digues en retrait).

Mots-clés

Agly, travaux entretien, sand-boils, Pyrénées Orientales

Abstract

The General Council of Pyrénées-Orientales owns nearly 27 km of flood protection dykes bordering the last 13,2 km of the coastal river Agly, from the RD900 bridge to the sea. Built between 1969 and 1974, these dykes protect the Salanque plain against flooding, *i.e.* a permanent population of 20,000 inhabitants rising to 65,000 during the tourist season.

The Department ensured the management of this work between 2007 and 2020. Since 2020 the Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly has taken over the management of the dikes within the framework of the GEMAPI law.

An in-depth diagnosis of the containment carried out in 2010 and 2011 concluded that the dyke was not safe enough. In order to permanently remedy this situation, as part of the diagnosis, a global program for securing the structure has been drawn up. This program comes in 2 stages:

- from 2011 until the reconstruction of the dykes, a program of "priority works",
- beyond that, a reconstruction program for dykes set back 30 m (8 to 10 years of work for an estimated amount of €50 million). It consists :
 - on the section located between the RD900 bridge in Rivesaltes and the RD1 bridge in Clairà, to rebuild the dykes set back 30 m from the current dykes and to create a structure resistant to overflow (spillway) on the bank LAW.
 - In the areas located between the RD1 and the sea, to move back the dykes when possible (land and technical constraints) or to rebuild or reinforce them in place.

It should be noted that on the 13.2 km between the RD900 bridge and the sea, there is currently no section of dike resistant to overflow. Thus, full-edge floods generate a very high risk of rupture.

The objective of the priority work program is to remedy the main problems noted on the dykes during the regulatory "In-depth Technical Inspections" (detailed inspections of the embankment), or routine inspections.

Since 2011, SAFEGE has been in charge of project management for maintenance work (priority work) on the dykes. Since 2011, maintenance work has been carried out every year.

Key Words

Agly, Sand-boils, priority work, Pyrénées-Orientales

Retour d'expérience des études préalables aux procédures de désaffectation, déclassement et neutralisation de la digue de l'Agouille de la Division dans la Plaine de la Salanque : cas d'ouvrage assimilable à des digues de second rang

A review of the studies carried out before the procedures for decommissioning, declassifying and neutralising the Agouille de la Division levee in the Plaine de la Salanque: a case study of a structure that can be assimilated to second-ranking levees

A. Bonnafé¹, P. Soulat¹, V. Grosjean¹, F. Nicoleau²

¹ Safege/Suez Consulting, Montpellier, France, arnaud.bonnafe@suez.com, patrick.soulat@suez.com, vivien.grosjean@suez.com

² Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly (SMBVA), Saint Paul de Fenouillet, France

Résumé

La digue de l'Agouille de la Division est un ouvrage qui a été classé B en 2012 en application du décret n°2007-1735. Cette digue est implantée dans la zone protégée des digues de l'Agly Maritime (Pyrénées Orientales). Les études de définition du système d'endiguement de l'Agly ont conclu sur l'incapacité de définir un niveau de protection et une zone protégée pour cet ouvrage vis-à-vis des débordements et contournements de l'Agly. Le Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly (GEMAPIEN) a alors engagé une réflexion autour de « la neutralisation » de ces digues.

La digue de l'Agouille de la Division a été édifiée à la fin du XIX^e siècle afin de protéger Saint-Laurent-de-la-Salanque des crues de l'Agly, non endiguée à cette époque. Depuis la construction des digues de l'Agly (1975), elle n'a plus joué de rôle dans la dynamique des crues, si ce n'est un simple rôle de drainage et de « déflecteurs » des eaux vers l'Etang de Salses Leucate. Des modélisations hydrauliques ont été développées, sur la base d'un modèle TELEMAT 2D commun au SMBVA et de la DDTM66. Ces modélisations ont permis d'affirmer que l'ouvrage n'est pas transparent hydrauliquement, bien qu'il soit impossible d'en associer un niveau de protection et une zone protégée. De plus, les évolutions anthropiques dans la plaine de la Salanque ont conduit à modifier le rôle originel de l'ouvrage et ses sollicitations au cours du temps.

Afin d'éclairer le SMBVA sur le devenir de l'ouvrage dans ce contexte de « systèmes imbriqués », un cadrage réglementaire et administratif de l'ouvrage a précédé les analyses hydrauliques de qualification de sur-aléa. La méthodologie de qualification des sur-aléas éventuels repose à la fois sur les notes DGALN/DGRP spécifiques aux neutralisations des digues, mais également sur les dynamiques d'inondation, au travers des vitesses de montées des eaux et des vitesses d'écoulement selon le décret PPRI de juillet 2019.

L'étude a permis de faire ressortir les points d'attention suivants à intégrer dans ce type d'étude :

- les interactions avec l'ensemble des ouvrages en remblai, ouvrages non « classés et non intégrés dans un système d'endiguement », mais non transparents hydrauliquement ;

- la notion de dynamique d'inondation et de venues d'eau dangereuses, notamment au travers des valeurs seuils de vitesses de montées des eaux ;
- enfin de la mise en perspective des notions de sur-aléas compte tenu de la qualification en aléas modérés pour des dynamiques rapides conformément au décret PPRI de juillet 2019.

Mots-clés

neutralisation, digue, sur-aléa, dynamique d'inondation, infrastructures

Abstract

The Agouille de la Division levee is a structure that was classified B in 2012 in application of decree no. 2007-1735. This dyke is located in the protected area of the Agly Maritime dykes (Pyrénées Orientales). The definition studies for the Agly dikes system were unable to define a level of protection and a protected area for this structure due to the overflows and bypasses of the Agly. As a result, the Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly (GEMAPIEN) initiated a study focused on "neutralising" these dykes.

The Agouille de la Division dyke was built at the end of the 19th century to protect Saint-Laurent-de-la-Salanque from the Agly flooding, which was not dammed at the time. Since the construction of the Agly dykes (1975), it has no longer had any role in flood dynamics, apart from simply draining and "deflecting" water towards the Etang de Salses Leucate. Hydraulic modelling was carried out using a TELEMAC 2D model shared by the SMBVA and the DDTM66. This model confirmed the structure is not hydraulically transparent, although it is impossible to determine a level of protection and identify a protected area. In addition, human activity in the Salanque plain has modified the original role of the structure and its pressure over time.

In order to provide SMBVA with a better understanding of the future of the structure in this context of "interlocking systems", a regulatory and administrative framework for the structure preceded the hydraulic analyses to qualify the higher hazard. The methodology for qualifying any higher hazard is based both on the DGALN/DGRP notes specific to the neutralisation of dykes, and also on flooding dynamics, through the velocity of water-level rise and flow velocities in accordance with the PPRI decree of July 2019.

The study highlighted the following points to be considered in this category of study:

- Interactions with all the embankment structures, which are not "classified and not integrated into a dike system", but which are not hydraulically transparent.
- The notion of flooding dynamics and dangerous water inflows, in particular through the threshold values for velocity of water-level rise.
- Finally, the notion of higher hazard, given the classification of rapid dynamics as a moderate hazard in accordance with the PPRI decree of July 2019.

Key Words

neutralisation, levees, higher hazard, flooding dynamics, infrastructures

Stratégie de classement des systèmes d'endiguement sur le territoire de Arche Agglo

Strategy for authorization of dikes on the territory of the Arche Agglo

E. Guilmin¹, O. Reynier¹, J. Chapier¹

¹ Arche Agglo, Mauves, France, e.guilmin@archeaagglo.fr

Résumé

Le 1^{er} janvier 2018, Arche Agglo a pris la compétence GEMAPI. Elle assure donc la gestion des digues et des ouvrages hydrauliques sur son territoire non couvert par un syndicat de rivière. Les aménagements hydrauliques et les systèmes d'endiguement, de classe C et hors classe principalement, ont fait l'objet d'un recensement en 2019-2020. Ce recensement fait état de 27 systèmes d'endiguement potentiels, protégeant de 0 à 13 000 personnes. Certains de ces systèmes sont composés de plusieurs digues élémentaires pouvant être associées à des aménagements hydrauliques de rétention.

Dans un premier temps, un groupe de travail composé d'élus et de techniciens de la communauté d'agglomération a été constitué pour définir les critères de classement. Entre 2021 et 2022, les élus communautaires ont donc été invités à se positionner sur une stratégie de classement dans le respect des exigences règlementaires et dans la mesure du possible compatible, avec les moyens humains et financiers de Arche Agglo. La stratégie retenue propose ainsi de ne pas classer les systèmes d'endiguement protégeant moins de 30 personnes et d'étudier au cas par cas ceux protégeant plus de 30 personnes avec pour objectif de limiter autant que possible le nombre final d'ouvrages de protection. Cette stratégie s'inscrit dans la durée car les moyens humains et financiers, conjugués à l'engorgement des bureaux d'études, ne permettent pas de faire un classement avant le 30/06/2024, date limite de demande d'autorisation pour les systèmes d'endiguement existants. La collectivité a donc acté un échelonnement des classements jusqu'en 2030.

Les conclusions de ce groupe de travail ont ensuite fait l'objet d'une présentation en commission « rivières » et au bureau de l'agglomération pour valider la stratégie et le plan de financement associé afin de répondre aux études et travaux règlementaires à engager. À la suite de cette validation, les communes possédant des digues ont été rencontrées pour présenter la stratégie et répondre à leurs interrogations. Dans un dernier temps, cette stratégie est communiquée auprès des Directions Départementales des Territoires de Drôme et d'Ardèche en tant que services instructeurs des demandes d'autorisation des systèmes d'endiguement.

Au final, ce sont entre 10 et 13 systèmes d'endiguement qui seront classés d'ici 2030 dont le principal est constitué des digues du Rhône pour lequel le linéaire d'ouvrage de protection a été réévalué par rapport à l'arrêté préfectoral de classement initial.

Mots-clés

stratégie, système d'endiguement, GEMAPI, classement

Abstract

On January 1st, 2018, Arche Agglo took on the GEMAPI skill. It therefore ensures the management of dykes and hydraulic structures on its territory not covered by a river corporation. These hydraulic facilities and embankment systems, mainly class C and non-class, were inventoried in 2019-2020. This count reports 27 potential containment systems, protecting from 0 to 13,000 people. Some of these systems are made up of several elementary dikes that can be combined with hydraulic retention like dam.

In a first time, a working group made up of elected officials and technicians from the agglomeration community was set up to define the classification criteria. Between 2021 and 2022, elected community representatives were therefore invited to arbitrate on a classification strategy in the respect of actual laws and compatible with Arche Agglo human and financial resources. The strategy adopted thus proposes not to classify the dike systems protecting fewer than 30 people and to study on a case-by-case basis those protecting more than 30 people with the aim of limiting the final number of protective structures as much as possible. This strategy is a long-term one because of human and financial resources, combined with the congestion of the design offices, do not allow an authorisation to be made before June 30, 2024, deadline for requesting authorisation for existing dike systems. The community has therefore decided to stagger the rankings until 2030.

Conclusions of this working group were then presented to the “rivers” commission and to the agglomeration office to validate the strategy and to set up human and financial resources. Following this validation, municipalities with dykes were met to present strategy and answer their questions. Finally, this strategy is communicated to the Departmental Directions of the Territories of Drôme and Ardèche as the services responsible for conducting authorisation requests for dike systems.

In the end, between 10 and 13 containment systems will be classify by 2030, the main one being the Rhône dykes for which the length of the protective structure has been reassessed in relation to the prefectural initial authorisation decree.

Key Words

strategy, dike system, GEMAPI, prefectural authorisation decree

**Aménagements contre les inondations
et restauration morphologique à Hauterives (France, 26)**
*Constructions against floods and morphological restoration
in Hauterives (France, 26)*

L. Fayel¹, T. Laurent¹, T. Collomb¹, P. Bouchet²

¹ ARTELIA, Echirolles, France, laetitia.fayel@arteliagroup.com ;
thomas.laurent@arteliagroup.com ; thierry.collomb@arteliagroup.com

² Communauté de Commune Porte Drômardèche, Saint-Vallier, France,
p.bouchet@portededromardeche.fr

Résumé

La commune d'Hauterives (26) est traversée par deux cours d'eau : La Galaure et son affluent de rive droite le Dravey, tous deux très contraints par le tissu urbain (lits mineurs anthropisés et lits majeurs totalement urbanisés, sans possibilité d'écoulement à moindre dommage).

Les inondations du centre-ville sont peu fréquentes (cependant déjà vues en 1937 et en 2013) mais elles peuvent être catastrophiques du fait des aléas constatés (fortes hauteurs d'eau) et compte tenu des enjeux particulièrement vulnérables (école, crèche, commerces).

Concernant le Dravey, des débordements se produisent pour des crues inférieures à la crue décennale.

Les objectifs principaux du projet sont de :

- sécuriser la population du centre urbain pour la crue d'occurrence centennale,
- optimiser les écoulements en crue,
- rétablir le transit des matériaux solides du Dravey vers la Galaure en retrouvant un profil en long d'équilibre et améliorer sa qualité éco-morphologique par reconquête des berges par un milieu rivulaire, un resserrement du lit d'étiage et le retour à une dynamique alluviale.

La Communauté de Communes Porte de Drôme-Ardèche exerce depuis le 1er janvier 2017 la compétence Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations. Les études préalables au PAPI, réalisées en 2015-2016 ont permis de définir les zones inondables de la Galaure et du Dravey et les aménagements nécessaires pour supprimer les inondations jusqu'à la crue centennale.

Sur la commune d'Hauterives, les travaux de protection contre les inondations, menés entre l'été 2022 et l'été 2023 et supervisés par ARTELIA, consistent à :

- la rehausse de la berge rive droite de la Galaure par un mur en béton armé, sur environ 500 ml, avec un batardeau amovible au niveau de la passerelle piétonne, avec prise en compte de l'intégration paysagère du projet (secteur touristique avec le Palais Idéal du Facteur Cheval),
- la réalisation d'un cuvelage en béton armé dans le lit du Dravey, dans un secteur très contraint entre murs d'habitations,
- la réalisation d'un nouveau lit naturel pour le Dravey sur sa partie aval, sur environ 200 ml jusqu'à la confluence avec la Galaure.

Les travaux ont démarré en septembre 2022 et se sont terminés en juin 2023 (hors certaines plantations et finitions), pour un montant d'environ 1,2 m€.

Mots-clés

inondation, rivière, mur, génie-civil, génie-végétal

Abstract

The municipality of Hauterives (26) is crossed by two watercourses: the Galaure river and its right bank tributary, the Dravey river, both heavily constrained by urban fabric (anthropized riverbeds and completely urbanized floodplains, with no possibility of discharge without significant damage). Flooding in the city center is infrequent (though observed in 1937 and 2013), but can be catastrophic due to identified hazards (high water levels) and given the particularly vulnerable stakes (school, nursery, shops).

Regarding the Dravey river, overflows occur for floods below the decennial flood.

The main objectives of the project are:

- Secure the population of the urban center for the centennial flood.
- Optimize flood flows.
- Restore the transit of solid materials from the Dravey river to the Galaure river by achieving a balanced longitudinal profile and improving its eco-morphological quality through the reclamation of riverbanks, a narrowing of the low water bed, and a return to alluvial dynamics.

Since January 1, 2017, the Porte de Drôme-Ardèche Community of Communes has been responsible for the management of aquatic environments and flood prevention. Preliminary studies for the "PAPI" (Program of flood prevention actions: a program contributing to the reinforcement of flood risk prevention in the territories), conducted in 2015-2016, defined the flood zones of the Galaure river and the Dravey river and the necessary developments to eliminate flooding up to the centennial flood.

In Hauterives, flood protection works carried out between summer 2022 and summer 2023, supervised by ARTELIA, include:

- Raising the right bank of the Galaure with a reinforced concrete wall over approximately 500 meters, with a removable cofferdam at the pedestrian bridge level, considering the landscape integration of the project (a tourist sector with the Ideal Palace of the Postman Cheval).
- Construction of a reinforced concrete tank in the bed of the Dravey river, in a highly constrained area between residential walls.
- Creation of a new natural bed for the Dravey river on its downstream part, over approximately 200 meters up to the confluence with the Galaure river.
- The works started in September 2022 and were completed in June 2023 (excluding some plantings and finishes), with a cost of approximately 1.2 million euros.

Key Words

flood, river, wall, civil engineering, plant engineering

Cadereaux de Nîmes : Utilisation de la méthode tunnelière dans la lutte contre les inondations

Cadereaux de Nîmes: Using the tunnelling method to combat flooding

A. Chambon¹, X. Bancal¹

¹ Tractebel Engineering, Nîmes, France, aymeric.chambon@tractebel.engie.com

Résumé

Depuis le XIV^e siècle, la ville de Nîmes connaît en moyenne cinq à huit inondations par siècle qui sont le fait de deux principales caractéristiques géographiques :

- le climat Méditerranéen, avec une alternance de longues périodes de sécheresse et d'intenses épisodes pluvieux. Les crues torrentielles débordent alors largement des lits mineurs et provoquent de nombreux dégâts en particulier en centre-ville ;
- la position de Nîmes, au pied de bassins versants qui lors de fortes pluies concentrent vers la ville les eaux de ruissellement du plateau calcaire des garrigues qui domine la ville d'une centaine de mètres.

Compte tenu de l'ampleur du sinistre après la crue d'octobre 1988, une commission hydraulique composée d'experts a étudié et proposé des solutions pour protéger la ville. Plusieurs programmes en sont issus : d'abord un Plan de Protection Contre les Inondations qui a conduit à la réalisation de 29 premiers ouvrages de rétention sur l'ensemble des cadereaux de la ville jusqu'en 2006, puis, à la suite des inondations de septembre 2005, trois Programmes d'Action et de Prévention des Inondations (PAPI) successifs ayant pour objet de coordonner à l'échelle de la ville les politiques de prévention des inondations et de diminution de la vulnérabilité.

Dans le cadre du PAPI 3 Vistre, deux cadereaux souterrains sont prévus sur la commune pour la traversée de la zone urbaine dense :

- le cadereau d'Uzès composé :
 - d'un tunnel de diamètre intérieur 3,3 m et d'une longueur de 980 m ;
 - d'un entonnement à air libre d'une longueur de 200 m ;
- le cadereau des Limites, composé de deux tunnels successifs :
 - le tronçon aval du tunnel, de diamètre intérieur 3,3 m et d'une longueur de 845 m ;
 - un ouvrage d'entonnement des eaux de ruissellement (cadre sous chaussée) ;
 - le tronçon amont du tunnel, de diamètre intérieur 2,2 m et d'une longueur de 395 m ;
 - un ouvrage d'entonnement des eaux en provenance du bassin versant amont (deux caniveaux en béton armé d'une longueur de 75 et 70 m).

La méthode tunnelière a été retenue à l'issue d'une étude multicritère, notamment pour limiter les nuisances aux riverains dans un contexte urbain dense. Le dimensionnement des ouvrages hydraulique a été fait par des modélisations numériques et validées par des maquettes physiques.

Les travaux débiteront au mois de novembre 2023 et s'achèveront en 2027.

Mots-clés

inondations, systèmes de protection complexes, zone Urbaine Dense, ouvrages souterrains, modèle hydraulique physique

Abstract

Since the 14th century, the city of Nîmes has experienced an average of five to eight floods per century, due to two main geographical characteristics:

- The Mediterranean climate, with alternating long periods of drought and intense rainy episodes. The torrential floods then largely overflow the minor beds and cause a lot of damage, particularly in the city center.
- Nîmes is located at the foot of watersheds, which, during heavy rainfall, concentrate runoff water towards the city from the limestone plateau that towers over the city by around a hundred meters.

Given the scale of the damage caused by the flood of October 1988, a hydraulic commission of experts studied and proposed solutions to protect the city. This resulted in several programs: firstly, a Flood Protection Plan which led to the construction of the first 29 retention structures on all of the city's watercourses until 2006, then, following the floods of September 2005, three successive Flood Prevention and Action Programs (PAPI) aimed at coordinating flood prevention and vulnerability reduction policies on a wider scale.

As part of the PAPI 3 Vistre, two underground tunnels are planned in the town to cross the dense urban area:

- The watercourse of Uzès is composed of:
 - a tunnel with an internal diameter of 3.3 m and a length of 980 m;
 - a 200 m-long open-air culvert;
- The watercourse of Les Limites, made up of two successive tunnels:
 - The downstream section of the tunnel, with an internal diameter of 3.3 m and a length of 845 m;
 - A structure for channeling runoff water (reinforced concrete frame under the roadway);
 - The upstream section of the tunnel, with an internal diameter of 2.2 m and a length of 395 m;
 - A structure for collecting water from the upstream watershed (two reinforced concrete channels with a length of 75 and 70 m).

The TBM (for tunnel boring machine) method was chosen following a multi-criteria study, in particular to limit nuisance to local residents in a dense urban context. The hydraulic structures were dimensioned using numerical modelling, validated by physical models.

Work will start in November 2023 and will be completed in 2027.

Key Words

flooding, complex protection systems, dense urban area, underground structures, physical hydraulic model

Thème 3

Connaissance et modélisation des aléas naturels

Comité scientifique

Animateurs des relectures et de la session orale

David Criado

Cerema

Thibaut de Ruffray

Eurométropole de Strasbourg

Relecteurs

Robert Slomp

Rijkswaterstaat

Damien Kuss

SYMBHI

Franck Compagnon

SMIAGE

Définition du niveau de protection en milieu maritime complexe -
Le système d'endiguement de Saint-Malo
*Defining the level of protection in a complex maritime environment -
The Saint-Malo levee system*

S. Billaudeau¹, A. Tardieu², A. Bernard³, G. Villemagne⁴

¹ ISL, billaudeau@isl.fr

² ISL, tardieu@isl.fr

³ CEREMA, alexis.bernard@cerema.fr

⁴ Saint Malo Agglomération, g.villemagne@stmalo-agglomeration.fr

Résumé

Construite initialement sur une péninsule rocheuse, la ville de Saint-Malo débute son développement au XVIII^e siècle avec l'endiguement des marais. L'anthropisation du territoire s'est prolongée par périodes avec la création des bassins portuaires. Aujourd'hui, le système de protection contre la submersion marine de classe A se compose de deux ensembles d'ouvrages : les digues Nord correspondant à une dune historique protégée par des parements maçonnés, soumises à la houle et les ouvrages portuaires fermant les bassins à l'Ouest.

La cité est connue pour ses franchissements spectaculaires et fréquents lors des grandes marées. La demande d'autorisation en système d'endiguement a donc dû s'attacher à caractériser précisément cet aléa maritime complexe. Le niveau de protection a été réfléchi selon la logique suivante : Quelle est la quantité d'eau acceptable dans la zone protégée (caractérisée en hauteur et vitesse) ? Combien de volume doit rentrer (franchir la digue) pour dépasser ces seuils ? Et enfin quelles caractéristiques physiques en mer conduisent à ces franchissements ? Il s'est avéré que ces caractéristiques peuvent être définies à partir d'une combinaison des trinômes ; hauteur de houles/période de la houle/niveaux marins. Ces trinômes peuvent être représentés sous forme d'abaque.

L'abaque est construit avec une modélisation SWAN pour la propagation des états de mer de l'échelle régionale jusqu'en pied des ouvrages de Saint Malo et une modélisation SWASH pour la définition des franchissements générés par chaque scénario de sollicitation. Le premier calage s'est appuyé sur une comparaison des résultats de propagation des états de mer aux différents modèles de houle valides sur les côtes Française comme Homère pour s'assurer de la validité des résultats. Ensuite, les différentes tempêtes historiques recensées à Saint-Malo ont été intégrées à l'abaque afin de comparer les inondations réellement observées et les prédictions de l'outil de définition du niveau de protection. Les résultats obtenus sont satisfaisants et ont permis de valider l'utilisation de l'abaque comme définition du niveau de protection. Le gestionnaire poursuit cette démarche en vérifiant le calage pour les nouvelles tempêtes et en envisageant la pose de caméra pour mesurer les débits de franchissement.

Mots-clés

franchissements, submersions, abaque, niveau de protection, modélisation maritime

Abstract

The city of Saint-Malo has the particularity to be located on a rock peninsula, and was historically build with marshes enclosure and the port basins creation. Over time, its urbanization gradually progressed with the creation of port basins. Nowadays, the flood protection infrastructure - classified as a Class A system - includes two distinctive components: the northern levees that corresponds to an ancient dune fortified by a brick-laying exposed to wave action - and harbor structures that close off the western basins.

Infamous for its recurrent wave overtopping during large tides, the marine hazards were to be meticulously determined for the approval of the coastal defense application. The degree of protection was based on critical considerations: defining an acceptable water volume within the protected area (specified in terms of height and velocity), establishing the threshold for volume intrusion (levee overflow), and identifying the characteristics contributing to these transgressions. This study revealed these characteristics can be encapsulated as a combination of "trios" and represented as an abacus: wave height, wave period, and sea level.

The abacus is built from a SWAN modeling for sea state propagation, from regional scale to Saint-Malo's structures, and from a SWASH modeling to define the generated wave overtopping for each stress scenario. The initial calibration is based on a comparison of sea state propagation results with various swell models applicable on the French coast - such as Homère – ensuring the results validity. Historical storm data from Saint Malo were then integrated into the abacus to compare the observed flooding with the prediction tool used to determine the protection level. The results were conclusive and validated the use of the abacus to set the protection level. The manager is now using this methodology, and periodically checks the abacus calibration for new storms. A camera network is even considered to eventually measure the wave overtopping flows.

Key Words

overtopping, submersions, abacus, coastal defences, maritime modelling

Méthodologie de calcul de la hauteur des vagues dues au vent et du run-up associé sur des grands linéaires d'endiguements

Methodology to estimate wind wave heights and associated run-up on large-scale dikes

M. Darbot¹, V. Fuchs²

¹ Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France, M.DARBOT@cnr.tm.fr

² Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France, V.FUCHS@cnr.tm.fr

Résumé

Dans le cadre de l'Arrêté du 6 août 2018 fixant les prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) doit vérifier la conformité de ses ouvrages classés à diverses exigences de sûreté. L'une de ces exigences est la conformité de la revanche pour faire face aux vagues soulevées par le vent selon plusieurs configurations combinant des conditions d'exploitation et des situations de vent : un vent de période de retour 50 ans soufflant sur une retenue qui se trouve à la cote des PHE (Plus Hautes Eaux) et un vent de période de retour 1 000 ans soufflant sur la retenue normale (RN). Toutefois, cette méthodologie peut être transposée aux systèmes d'endiguements aux niveaux de protections souhaités, notamment aux digues de protections contre les submersions marines.

Dans le cadre de cette démarche, CNR, responsable d'un linéaire important d'endiguements le long du Rhône (près de 400 km), a eu besoin de mettre au point des méthodes homogènes de justification de la conformité de ses ouvrages. Pour cela, un benchmark a permis de déterminer la méthodologie et les formules les plus appropriées pour cette justification sur un grand linéaire. La méthode consiste à déterminer la longueur du fetch (longueur du plan d'eau sur laquelle souffle le vent et génère des vagues) à partir d'un outil développé sur système d'information géographique (SIG), puis de calculer les caractéristiques des vagues (hauteur, période, déferlement...) pour enfin calculer le run-up à partir des caractéristiques géométriques des talus amont (partie immergée/émergée) et de la nature des protections (enrochements/bitume). Ces calculs permettent d'estimer la revanche nécessaire aux vagues engendrées par le vent. Les données de revanche associées aux différentes lignes d'eau sont alors comparées avec les cotes de crête des digues des ouvrages de CNR.

Cette méthodologie est appliquée sur tout le linéaire d'endiguement de la vallée du Rhône du domaine CNR et permet de mettre en évidence les secteurs où les vagues sont susceptibles de franchir la crête des ouvrages.

Mots-clés

ouvrage hydraulique, digue, canaux, revanche, run-up

Abstract

Since these decree of the Order of August 6, 2018 setting out the technical requirements for dam safety, Compagnie Nationale du Rhône (CNR) must verify the compliance of its classified structures with various safety requirements. One of these requirements is the compliance of the freeboard with respect to wind-driven waves according to several configurations combining operating conditions and wind situations: a 50-year return period wind blowing on a reservoir that is at the PHE (Highest Water Level) elevation and a 1,000-year return period wind blowing on the normal reservoir (RN). Nevertheless, this methodology can be transposed to diking systems with the desired levels of protection, in particular dikes to protect against marine flooding.

As part of this approach, CNR, that is responsible for a large number of dikes along the Rhône (nearly 400 km), needed to develop consistent methods to justify the conformity of its structures. To achieve this goal, a benchmark was used to determine the most appropriate methodology and formulas over a large linear stretch. The method consists in determining the length of the fetch (the length of water over which the wind blows and generates waves) using a tool developed on a geographic information system (GIS), calculating the characteristics of the waves (height, period, breaking, etc.) and finally calculating the run-up from the geometric characteristics of the upstream embankments (immersed/emersed part) and the nature of the protection (riprap/bitumen). These calculations enable us to estimate the required freeboard to face wind-generated waves. The freeboard data associated with the various water lines are then compared with the crest heights of the CNR dikes.

This methodology has been applied to the entire length of CNR's Rhone valley dikes, highlighting areas where waves are likely to cross the crest of the dikes.

Key Words

hydraulic structure, dyke, canals, run-up

**Aide à la conception des systèmes de protection contre les crues
des Rios La Leche et Motupe (Lambayeque, Pérou)**
*Assisting in the design flood protection systems
for the Rios La Leche et Motupe (Lambayeque, Peru)*

L. Boudet¹, G. Raccasi¹, S. Huard¹, L. Ponsard¹, C. Grimaldi¹

¹ Ingérop, Aix-en-Provence, France, laurie.boudet@ingerop.com

Résumé

La partie nord du Pérou est soumise à des crues dévastatrices, sous la contrainte principale de précipitations diluviennes, au cours des épisodes El Niño.

Sur le bassin versant des rivières Motupe et La Leche, les autorités ont décidé de mettre en place un grand plan de mise en sécurité des biens et des personnes à la suite de l'épisode de El Niño de 2017 (FEN2017). Ce projet doit prendre en compte l'augmentation des précipitations inhérente au changement climatique, ainsi que la construction de barrages écrêteurs en tête de bassin.

Au regard des contraintes locales, les aménagements, prévus au plan à mettre en œuvre, sont positionnés dans l'environnement immédiat des cours d'eau, voire en substitution des berges.

Sur le plan géomorphologique, le bassin s'inscrit dans un contexte de cône de déjection sableux, qui s'étale sur une centaine de kilomètres. Cet hydrosystème est très mobile aux moindres sollicitations hydrauliques. Cela implique de mettre en œuvre une approche globale du fonctionnement de la dynamique morphologique, sur plus de 200 km de cours d'eau.

Dans un premier temps, le travail réalisé porte sur la détermination de l'espace de bon fonctionnement morphologique et hydraulique des cours d'eau. L'exploitation d'images aériennes diachroniques, de données topographiques hautes résolutions et des résultats d'une modélisation hydraulique fine, réalisée à l'échelle du bassin versant, permet d'identifier les secteurs les plus sensibles à la mobilité du cours d'eau, dans le fonctionnement actuel et projeté de l'hydrosystème. Les résultats de l'analyse permettent d'optimiser le positionnement et la conception des ouvrages.

Le second volet de l'étude vise à définir l'affouillement potentiel sur l'ensemble du linéaire fluvial. Les cours d'eau sableux peuvent présenter des fosses d'affouillement très profondes, ce qui nécessite de concevoir des protections conséquentes pour les ouvrages implantés en berge.

Le croisement de ces deux approches permet de définir les caractéristiques des fondations à mettre en œuvre, prenant en compte la profondeur d'affouillement potentiel, ainsi qu'un risque estimé de divagation du lit mineur jusqu'au pied de l'ouvrage.

Les résultats de l'analyse et les conséquences sur le dimensionnement des aménagements sont présentés sur un site représentatif : au droit d'un site archéologique majeur de l'Amérique du Sud (Bosque de Pómac), sur La Leche.

Mots-clés

espace de bon fonctionnement, affouillement, El Niño, digue, dynamique fluviale

Abstract

The northern part of Peru is subject to devastating floods, mainly as a result of torrential rainfall during El Niño episodes.

In the catchment area of the Motupe and La Leche rivers, the authorities have decided to implement a major plan to make property and people safe following the 2017 El Niño episode (FEN2017). This project must take into account the increase in rainfall inherent in climate change, as well as the construction of flood control dams at the head of the basin.

In view of the local constraints, the facilities provided for in the plan to be implemented are positioned in the immediate vicinity of the watercourses, or even in place of the banks.

From a geomorphological point of view, the basin is part of a sandy alluvial fan that extends for around a hundred kilometres. This hydrosystem is highly mobile when subjected to the slightest hydraulic stress. This means that a global approach to the functioning of morphological dynamics needs to be implemented over more than 200 km of watercourses.

Initially, the work carried out focused on determining the area of good morphological and hydraulic functioning of the watercourses. Using diachronic aerial images, high-resolution topographic data and the results of detailed hydraulic modelling carried out at catchment scale, it is possible to identify the sectors most sensitive to river mobility, in the current and projected functioning of the hydrosystem. The results of the analysis will be used to optimise the positioning and design of the structures.

The second part of the study aims to define potential scouring along the entire length of the river. Sandy watercourses can have very deep scour pits, which means that substantial protection needs to be designed for structures on the banks.

By combining these two approaches, it is possible to define the characteristics of the foundations to be used, taking into account the depth of potential scouring, as well as the estimated risk of the minor riverbed wandering to the foot of the structure.

The results of the analysis and the consequences for the design of the structures are presented at a representative site: a major archaeological site in South America (Bosque de Pómac), on La Leche.

Key Words

space for river, scour, El Niño, dikes, fluvial dynamics

**Étude de dangers de la digue de la Rivière-des-pluies (Réunion) :
méthodologie simplifiée de prise en compte des évolutions
morphologiques du lit pour caractériser les sollicitations hydrauliques**
*Hazard study of Rivière-des-pluies levee system (Réunion): simplified
methodology to include bed morphological evolution in hydraulic action
assessment*

**D. Criado¹, P. Ledoux¹, M. Alquier¹, S. Roux³, S. Staal², E. Caro²,
I. Roux¹, E. Paya¹, C. Peteuil³**

¹ Cerema, DTer Méditerranée, Aix-en-Provence, France, david.criado@cerema.fr

² Deal Réunion, Saint-Denis la Réunion, France,
Sabine.Staal@developpement-durable.gouv.fr

³ Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France, S.Roux@cnr.tm.fr

Résumé

La DEAL de La Réunion a sollicité le Cerema pour réaliser une actualisation de l'étude de dangers (EDD), pièce nécessaire à l'autorisation initiale du système d'endiguement protégeant la zone aéroportuaire « Roland Garros » dont elle est gestionnaire.

La rivière des Pluies est soumise à des évolutions morphologiques majeures en crue qui peuvent avoir d'importantes conséquences sur l'évaluation des niveaux de crue et la capacité du système d'endiguement à empêcher l'inondation de la zone protégée. Une expertise du transport solide a donc été confiée à la Compagnie Nationale du Rhône en parallèle à l'EDD.

Les principaux défis de l'étude concernent :

- la possibilité d'intégrer les évolutions morphologiques estimées du lit dans les modélisations hydrauliques bidimensionnelles sur fond modifié ;
- l'anticipation des évolutions du fond dans la caractérisation du niveau de protection du système d'endiguement et l'organisation mise en place pour la surveillance des ouvrages.

La méthode et les outils utilisés pour évaluer les évolutions morphologiques de la Rivière des Pluies à différentes échéances et estimer les affouillements au droit des ouvrages sont :

- évaluation des stocks de matériaux disponibles dans le bassin amont ;
- recherche des évolutions historiques du cours d'eau et du littoral ;
- étude de sensibilité des différents paramètres pris en compte dans l'évaluation des évolutions morphologiques ;
- modélisation unidimensionnelle simulant le processus d'érosion et de dépôt survenant au cours d'une crue torrentielle intense à l'aide du logiciel « EVOFOND » ;
- parangonnage des résultats de modèles physiques mis en œuvre dans des contextes similaires sur l'île (affouillements).

Les épaisseurs de dépôts sédimentaires par charriage évaluées dans le secteur d'étude lors d'une crue peuvent atteindre + 3 m. Des épaisseurs bien plus importantes sont attendues sur le plus long terme.

Les développements méthodologiques réalisés concernent :

- l'intégration des résultats de l'étude de transport solide (EVOFOND 1D) dans les simulations hydrauliques bidimensionnelles sur fond modifié (TELEMAC 2D) ;

- le choix des scénarios de défaillance des ouvrages et la caractérisation hydraulique des conséquences dans la zone protégée.

Des résultats de travaux exploratoires portant sur des simulations hydrauliques couplées, transport solide (module GAIA de la chaîne open-TELEMAC 2D) et hydraulique, sont présentés. Les critères du choix du niveau de protection, les conséquences en termes de gestion de crise, et les principales recommandations sont présentés.

Mots-clés

étude de dangers, transport solide, modélisation hydraulique, affouillement, digue

Abstract

French local authority department on the island of "La Reunion", oversees the levee system located along the "Rivière des Pluies" which protects the Roland Garros Airport area from floodings. According to French regulation, an update of the hazard study (EDD) was necessary and has been carried out by the Cerema. The "Rivière des Pluies" is subject to major morphological changes during floods that can have important consequences on the assessment of the risks levels. Sediment transport analyses have therefore been entrusted to the "Compagnie Nationale du Rhône", as part of the hazard study. The main challenges of the study thus relate to:

- the possibility of integrating the estimated bed morphological evolutions into two-dimensional hydraulic modelling;
- predict the river changes in the flood defense system management.

The method and tools used to evaluate the morphological changes and estimate the scour depth close to the structures are:

- assessment of available sediment stocks in the upstream basin;
- research of historical evolutions of the river and coastline;
- sensitivity analysis of the key parameters;
- one-dimensional modelling simulating the process of erosion and deposition occurring during torrential flood using the "EVOFOND" software;
- benchmarking of the physical models results in similar contexts on the island (scouring).

The thicknesses of sediment bedload deposits evaluated in the study area during a single flood can reach + 3m. Much greater thicknesses are expected regarding long-term deposits. The methodological developments relate to:

- integration of the sediment transport results (EVOFOND 1D) into two-dimensional hydraulic simulations on modified bed (TELEMAC 2D);
- the choice of structural failure scenarios and hydraulic characterization of the consequences in the leveedarea.

Results of exploratory works on coupled hydraulics and solid transport (using GAIA module of the open-TELEMAC modelling system) are presented. Criteria for risk assessment, consequences in terms of flood management, and recommendations are presented.

Key Words

hazard studies, sediment transport, free-surface flow modelling, levee, scour

Exploitation contemporaine du retour d'expérience
conduit par l'architecte Mathieu à la suite des crues
de 1707 et 1709 sur la Loire

*Contemporary use of feedback from the experience gained
by the architect Mathieu following the floods of 1707 and 1709
on the Loire River*

S. Patouillard¹, C. Trouillard¹

¹ DREAL Centre – Val de Loire, Orléans, France,
sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

Résumé

Les événements de crue sur la Loire ont été suivis sur plusieurs siècles et de nombreuses données sont disponibles en tant qu'archives historiques sans pour autant avoir été vraiment exploitées du point de vue technique si on exclut les grandes crues de la fin du XIX^e siècle. C'est notamment le cas des crues exceptionnelles qui se sont produites au XVIII^e siècle et qui faisaient l'objet d'un suivi par le service des Turcies et Levées sous l'ancien régime. La mise à disposition par la Bibliothèque Nationale de France d'une carte du *Sieur* Mathieu, architecte du roi, assortie de croquis et de commentaires permet d'appréhender les conséquences des inondations extraordinaires survenues en octobre 1707 et juin 1709 sur 80 km du cours de la Loire depuis Briare jusqu'à Orléans. Cette carte nous informe sur la morphologie du cours d'eau, le positionnement des levées et des brèches subséquentes aux crues (cf. extrait de la carte), la structure des levées, les caractéristiques des brèches et les conséquences des entrées d'eau dans le val sur les enjeux agricoles. Les deux crues successives (à 18 mois d'intervalle) ont surversé les levées de 3 à 4 *pieds* (1 m à 1,30 m) et conduit à la formation de cinquante-cinq brèches totalisant une longueur de 4 004 *toises* (7,8 km). Sur la base de ces informations particulièrement détaillées, la DREAL Centre Val de Loire a entrepris une exploitation géomatique des éléments cartographiques et un catalogage des données de façon à pouvoir élargir sa base de données sur les brèches de Loire. Ce travail est rendu complexe par plusieurs différences d'approches techniques (écriture et unités de mesure anciennes ; échelle déformée en x et y et format de carte incompatible avec le géoréférencement ; importance accordée à certaines données différentes des standards actuels). L'objet de l'article est de présenter les précieux enseignements qui pourraient être retirés des événements de crues du XVIII^e siècle, de présenter le document et ses apports concernant les crues de 1707 et 1709 ainsi que les tentatives d'exploitation des données qu'il contient pour alimenter notre connaissance des ouvrages actuels et notamment de leur sensibilité à la formation de brèches.

Mots-clés

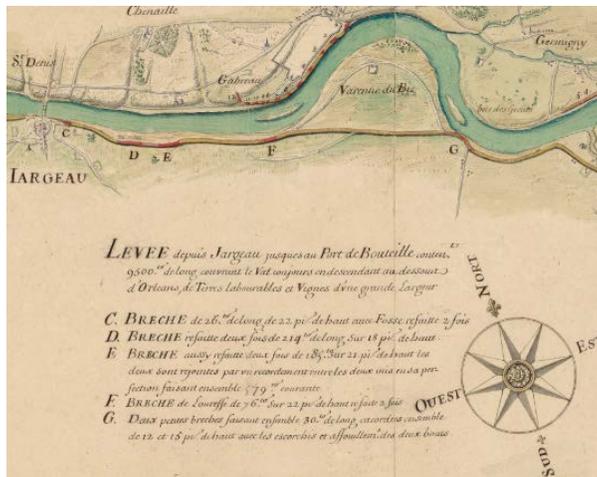
cartographie, brèche, levée, XVIII^e siècle, crues

Abstract

Flood events on the Loire River have been monitored over several centuries and a lot of information is available in historical archives, although it has not really been used from a technical point of view, if we exclude the major floods at the end of the 19th century. This is particularly true of the exceptional floods that occurred in the 18th century, which were monitored by the *Turcies and Levées* department under the *Ancien Régime*. The fact that the *Bibliothèque de France* has made available a map by *Sieur Mathieu*, King's architect, with drawings and commentary, gives us an idea of the consequences of the extraordinary flooding that occurred in October 1707 and June 1709 along 80 km of the Loire River from Briare to Orléans. This historical map provides us with information on the morphology of the river, the positioning of the levees and breaches following the floods (see extract from the map), the levees structures, the characteristics of the breaches and the consequences of the water entering the valley on agricultural issues. These two successive events (18 months apart) overtopped the levees by 3 to 4 *pieds* (1 m to 1,30 m) and led to the formation of fifty-five breaches totaling a length of 4,004 *toises* (7,8 km). On the basis of this particularly detailed information, the DREAL Centre Val de Loire has undertaken a geomatic exploitation of the cartographic elements and a cataloguing of data so as to be able to extend its database on the breaches of the Loire. This work is complicated by a number of different technical approaches (old writing and units of measurement; distorted scale in x and y and map format incompatible with georeferencing; importance attached to certain data that differs from current standards). The purpose of this article is to present the lessons that can be learned from the flooding events of the 18th century, to present the document and its contribution regarding the floods of 1707 and 1709 and the attempts to use this document to improve our knowledge of current structures and in particular their susceptibility to breach formation.

Key Words

cartography, breach, levee, 18th century, floods



Extrait de la Carte de Mathieu présentant les levées et les brèches à l'amont de Jargeau suite aux crues de 1707 et 1709

Extract from Mathieu's map showing the levees and breaches upstream of Jargeau following the floods of 1707 and 1709

Instrumentation de la digue de La Riche : première étape vers un observatoire des interactions sols-climat

Levee of La Riche's Instrumentation: a first step forward soil-atmosphere interaction observation

**Y. Boussafir¹, D. Mercadier², L. Saussaye³, J. Bisson⁴,
S. Patouillard⁴, A. Matynia⁵, C. Brulé⁶, F. Guirado¹**

¹ Université Gustave Eiffel / GERS / SRO, Marne-la-Vallée, France,

vasmina.boussafir@univ-eiffel.fr

² Cerema DTer Normandie-Centre, Rouen, France, dimitri.mercadier@cerema.fr

³ Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France, lucile.saussaye@cerema.fr

⁴ Dreal Centre-Val de Loire, Orléans, France,

sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

⁵ Direction Départementale des Territoires d'Indre-et-Loire, Tours, France,

anthony.matynia@developpement-durable.gouv.fr

⁶ Tours Métropole val de Loire, Tours, France, c.brule@tours-metropole.fr

Résumé

Le changement climatique a des effets perceptibles sur notre environnement immédiat, que ce soit sur la modification de la météorologie, le niveau d'eau dans les rivières, l'intensité des aléas « inondations », la sévérité des étiages ou les niveaux de nappes phréatiques. Les effets indirects pouvant impacter les ouvrages hydrauliques sont malheureusement rarement quantifiés mais commencent à être documentés. Certains gestionnaires commencent également à se préoccuper de ces effets et souhaitent s'en prémunir.

La recherche de nouveaux indicateurs de performance des ouvrages en lien avec les effets du changement climatique nécessite de disposer de données quantitatives. L'article présentera l'observatoire des interactions sols-climat mis en place sur la digue de La Riche grâce au partenariat entre la Dreal Centre - Val de Loire, Tours Métropole val de Loire, la Direction Départementale des Territoires d'Indre-et-Loire, le Cerema et l'Université Gustave Eiffel. Les capteurs mis en place en mars 2023 à l'occasion des travaux d'épaississement de la digue de La Riche, permettront d'acquérir des données couplées de sol et de météorologie. Le jeu de capteurs prévu pour le suivi comprend des sondes tensiométriques, des sondes de mesure de teneur en eau volumique et de température, une station météorologique, des piézomètres et une caméra. L'interprétation de ces données devrait enrichir notre compréhension des phénomènes et permettre de développer une doctrine concernant l'adaptation des ouvrages en terre de protection contre les inondations au changement climatique. L'article présente le détail de l'instrumentation mise en œuvre et les objectifs recherchés.

Mots-clés

changement climatique, instrumentation, digue, capteurs, observatoire

Abstract

Climate changes are having perceptible effects on our immediate environment, whether in terms of changes in weather patterns, water levels in rivers, the intensity of flood hazards, the severity of low-water periods or groundwater levels. They may also have effects on levees (Dyer *et al.*, 2007 and 2009; Bottema *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2018), but these are not enough documented. Some managers wish to protect themselves against this and are taking steps to do so (Etablissement Public Loire, 2018).

New indicators of the performance of structures in relation to climate change are needed to help define the damage to protection structures. This article presents the soil-climate interaction observatory set up on La Riche levee thanks to the Dreal Centre-Val de Loire, Tours Métropole Val de Loire, the Direction Départementale des Territoires of Indre-et-Loire, Cerema and the Gustave Eiffel University. The sensors, which were installed in March 2023 during reinforcement work, will procure coupled data both from soil and meteorological data. The set of sensors planned for monitoring includes tensiometric probes, probes for measuring volumetric water content and temperature, a weather station, piezometers and a camera. Interpretation of these data should enhance our understanding of the soil-atmosphere interaction phenomena and enable us to develop a doctrine for adapting structures as levees to climate change. This article presents details of the instrumentation used and the objectives sought.

Key Words

climate change, monitoring, levee, sensors, observatory

Étude hydraulique de la Retrève :
Modélisation hydraulique et propositions d'aménagement
Hydraulic study of the Retrève:
Hydraulic modelling and project proposals

E. Lavaud¹

¹ Cerema, Blois, France, emmanuel.lavaud@cerema.fr

Résumé

De nombreux cours d'eau métropolitains ont connu des crues exceptionnelles en mai et juin 2016. Le département du Loiret a été lourdement touché, notamment sur le bassin versant du Loing, mais également dans le secteur nord d'Orléans, par la Retrève. Cette dernière a inondé durant plusieurs jours les communes de Cercottes, Gidy, Bricy et Coinces (ainsi qu'Huêtre et Boulay-les-Barres dans une moindre mesure). Elle a également inondé de nombreux axes routiers, engendrant leur coupure, comme cela a été le cas pour l'autoroute A10 et la RD 2020.

C'est pourquoi, afin de disposer d'une meilleure compréhension des phénomènes ayant conduit au débordement de la Retrève, M. le Préfet de la Région Centre-Val-de-Loire a confié en 2018 le pilotage d'une étude à la Direction Départementale des Territoires du Loiret. Ainsi, l'Etat, le Conseil Départemental du Loiret, la Métropole d'Orléans, COFIROUTE, la Communauté de communes de la Beauce Loiretaine et la Communauté de communes de la Forêt ont décidé d'engager le projet l'étude hydraulique et hydrogéologique du bassin versant de la Retrève, en confiant sa réalisation au BRGM et au Cerema.

Le Cerema a ainsi proposé une modélisation hydraulique pour reconstituer l'événement de 2016 et pour proposer des solutions d'aménagement pour ce type d'événement (probablement une T_{200}) : en accord avec le pilote de l'étude (DDT45) et le comité de suivi, ce sont ainsi 5 types d'aménagement (5 géométries) qui sont testés, pour une crue similaire à celle de 2016 et pour une crue T_{50} .

Compte tenu de l'absence de mesures in situ et du manque de données hydrologiques, les données de forçage du modèle sont des hydrogrammes types fournis par le BRGM. Ils sont donc entachés de très fortes incertitudes (dans la forme, la durée etc.). C'est pourquoi, seules deux périodes de retour ont été testées : une extrême (type 2016) et une crue type cinquantennale T_{50} , permettant d'approcher les premiers débordements sur l'autoroute A10. Concernant la prise en compte du réchauffement climatique, et même si celui-ci aurait un impact probable, il n'a pas été étudié.

La modélisation en « full 2D » (logiciel HEC-RAS 6.1) avec intégration de tous les ouvrages impactant potentiellement les écoulements a permis une analyse pertinente de l'événement de 2016. Le modèle a pu être calé grâce aux nombreux témoignages recueillis lors de l'enquête de lasses de crue réalisée par le Cerema. S'il a été prouvé que le creusement d'un « canal » en rive droite de la station d'épuration n'aurait pas permis une meilleure évacuation de l'eau en 2016, on montre que les aménagements hydrauliques prévus sous l'autoroute A10 protègent bien pour une crue type cinquantennale.

Mots-clés

hydraulique, modélisation 2D, A10, ouvrages, Retrève

Abstract

Many metropolitan rivers experienced exceptional floods in May and June 2016. The Loiret department was heavily affected, particularly in the Loing River basin, as well as in the northern sector of Orléans, by the Retrève River. The Retrève River flooded the towns of Cercottes, Gidy, Bricy, and Coinces for several days (as well as Huêtre and Boulay-les-Barres to a lesser extent). It also flooded numerous roadways, causing their closure, including the A10 highway and RD 2020.

Therefore, in order to gain a better understanding of the factors that led to the Retrève River overflowing, the Prefect of the Centre-Val-de-Loire Region commissioned a study in 2018 to be carried out by the Loiret Departmental Directorate of Territories. As a result, the State, the Loiret Departmental Council, the Orléans Metropolitan Area, COFIROUTE, the Beauce Loiretaine Community of Communes, and the Forêt Community of Communes decided to initiate the hydraulic and hydrogeological study of the Retrève River basin, entrusting its implementation to BRGM and Cerema.

Cerema proposed a hydraulic modeling to recreate the 2016 event and suggest development solutions for such an event (likely a T200). In accordance with the study's coordinator (DDT45) and the monitoring committee, five types of development (five geometries) are being tested for a flood similar to that of 2016 and for a T50 flood.

Due to the absence of in-situ measurements and a lack of hydrological data, the model's forcing data consists of typical hydrographs provided by BRGM. Therefore, they are subject to significant uncertainties (in terms of shape, duration, etc.). This is why only two return periods have been tested: an extreme one (similar to 2016) and a 50-year flood, allowing for an approximation of the initial overflow on the A10 highway. Regarding the consideration of climate change, even though it is likely to have an impact, it has not been studied.

The "full 2D" modeling (HEC-RAS 6.1 software) with the integration of all structures potentially affecting flows allowed for a meaningful analysis of the 2016 event. The model was calibrated thanks to the numerous testimonials collected during the floodplain survey conducted by Cerema.

While it has been proven that digging a "canal" on the right bank of the sewage treatment plant would not have improved water evacuation in 2016, it is shown that the hydraulic developments planned under the A10 highway provide good protection for a 50-year flood.

Keyword

hydraulics, modeling 2D, A10, structures, Retrève

Le caractère significatif des étiages pour la stabilité des ouvrages composant les systèmes d'endiguement fluvio-maritimes de la Seine en aval de Rouen

The importance of low-water in the stability of fluvio-maritime embankments of the Seine downstream of Rouen

J.F. Frezet¹, F. Borsellino¹, A. Allies², P.-A. Rielland³, Y. Labiste⁴

¹ Egis, Seyssins, France, jean-francois.frezet@egis-group.com ;
fabien.borsellino@egis-group.com

² Egis, Montpellier, France, alexandre.allies@egis-group.com

³ Artelia, Echirrolles, France, pierre-alain.rielland@arteliagroup.com

⁴ Syndicat Mixte de Gestion de la Seine Normande, Rouen, France,
yann.labiste@seinemaritime.fr

Résumé

Les systèmes d'endiguement en milieu fluvio-maritime présentent des particularités remarquables dans leur mode de sollicitation. Ils ne subissent qu'une partie des sollicitations marines, dans la mesure où ils sont relativement abrités des houles. Les sollicitations hydrauliques d'origine marine sont donc, pour l'essentiel, dues aux marées et aux surcotes liées aux événements météorologiques. Les sollicitations fluviales sont plus classiquement liées aux crues. Des sollicitations liées à la navigation peuvent s'ajouter.

Il en résulte donc des sollicitations cycliques avec des variations journalières du niveau de l'eau pouvant être importantes en fonction de la composante de marée. Cela peut se traduire par des mises en charge régulières des digues, même en dehors d'événements hydrométéo (crue et/ou tempête). Le cas de charge correspondant à la décrue se produit de couramment en périodes de grandes marées, et la variation de niveau peut également être très importante en période d'étiage où la sollicitation prépondérante sera déterminée par la marée, mais dont l'effet pourra être accentué par des décotes.

La Seine en aval de Rouen et en amont de Rives-en-Seine est sous le régime hydrodynamique fluvio-maritime. Elle présente la caractéristique d'avoir des endiguements relativement modestes vus de la zone protégée, calés pour des événements de périodes de retour relativement fréquentes autour de 2 / 10 ans dans certains secteurs selon le retour d'expérience des événements de 2020. Ces endiguements sont bien plus importants du côté du fleuve, avec des hauteurs de rampant supérieures à 5 m. De ce fait, les sollicitations les plus critiques ne sont pas nécessairement pendant les événements liés aux événements hydrométéo. Par exemple l'amplitude entre pleine mer et basse mer, lors de la crue de Mars 2020 à Heurteville est identique à celle constatée en août 2022 pendant l'épisode de sécheresse qui a généré un étiage sévère, soit environ 4,5 m. La hauteur maximale est en revanche plus faible d'environ 1,5 m et il en résulte une sollicitation des parties basses des perrés qui peut être plus défavorable qu'en crue selon le niveau de la nappe.

Il en découle l'intérêt d'intégrer ces spécificités dans l'élaboration du plan de gestion et de surveillance de ces mêmes ouvrages.

Mots-clés

digue, fluvio-maritime, étiage, changement climatique, stabilité

Abstract

Embankment systems in fluvio-maritime domain have specific failure modes. They are subject to only part of sea induce assault because they are relatively sheltered from swells. Hydraulic stresses of marine origin are therefore mainly due to tides and surges linked to meteorological events. River stresses are more traditionally linked to floods. Navigation-related stresses can also be added.

The result is cyclical stress, with daily variations in water level that can be significant depending on the tidal component. This results in twice daily variations of the water, even when there is no flood. The case of loading corresponding to the rapid drawdown occurs twice daily during periods of high tide, and the variation in level can also be very significant during periods of low water, when the predominant stress will be determined by the tide.

The Seine downstream of Rouen and upstream of Rives-en-Seine is subject to fluvio-maritime hydrodynamics. It has the characteristic of having relatively modest embankment when viewed from the protected zone, designed for events with relatively frequent return periods of around 2 to 10 years in certain sectors, according to feedback from events in 2020. These embankments are much larger when viewed from the river, with slope heights in excess of 5m. As a result, the most critical stresses do not necessarily occur during flood and storm events. For example, the amplitude between high water and low water during the March 2020 flood at Heurteauville is identical to that observed in August 2022 during the drought episode that generated severe low water, i.e. around 4.5 m. However, the maximum height is around 1.5 m lower, which means that the lower parts of the embankment may be subjected to greater stress than during a flood, depending on the level of the water table.

As a result, these specific features need to be taken into account when defining the maintenance and monitoring plan for these structures.

Key Words

embankment, tides, low water, climate change, slope-stability

Thème 4

Connaissance, y compris retour d'expérience, et modélisation des modes de rupture, des mécanismes et scénarios de défaillance des ouvrages et des systèmes

Comité scientifique

Animateurs des relectures et de la session orale

Jean-Robert Courivaud	EDF CIH
Nathalie Rosin-Corre	Tractebel

Relecteurs

Fabien Anselmet	École Centrale Marseille
Muriel Gasc	Cerema / Revue Française de Géotechnique
Romain Granjon	CNR
Michel Pinhas	Expert individuel

Les ruptures des digues de protection : mécanismes et approche par scénarios

Failures of flood protection levees: mechanisms and scenarios

R. Tourment¹, B. Beullac¹

¹ INRAE, Aix en Provence, France, remy.tourment@inrae.fr

Résumé

Les ruptures de digues de protection contre les inondations (dont le résultat final est la brèche et l'inondation qui en résulte dans les zones protégées) sont le plus souvent la conséquence non pas d'un mécanisme de détérioration unique mais d'un enchaînement de mécanismes de détérioration dont certains peuvent, selon les conditions, se dérouler simultanément.

L'identification de ces scénarios de défaillance est utile voire nécessaire pour atteindre différents objectifs :

- dans le cadre de la réalisation de diagnostic structurel, d'analyse du risque, d'étude de dangers, pour bien évaluer la performance de la digue ;
- dans le cas d'une rupture de digue ou d'une nécessité de confortement, pour adapter au mieux les travaux aux mécanismes ayant causé ou risquant de causer la rupture ;
- dans le cadre de la mise au point de méthodes d'évaluation des probabilités de rupture, pour être le plus conforme à la réalité des phénomènes et de leurs enchaînements.

Les « modes de rupture » classiques (érosion externe, érosion interne, érosion par surverse, glissement, soulèvement hydraulique du pied aval...), qui sont encore souvent considérés dans les diagnostics de digues, sont baptisés du nom d'un seul mécanisme de détérioration, en général le mécanisme initiateur ou prépondérant de scénarios pouvant conduire à la rupture. Cette pratique laisse à penser qu'un seul mécanisme est à l'œuvre lors de la rupture d'une digue, ce qui amène souvent à des erreurs de diagnostic et/ou d'évaluation de performance lors d'études trop rapidement conduites. Par ailleurs, le fait de considérer les enchaînements possibles lors de la conception d'un ouvrage peut amener à une conception plus sûre et/ou dans certains cas, plus économique.

Dans cette communication, les auteurs développent les bénéfices de l'utilisation d'une approche par scénarios de défaillance. Les apports issus de plusieurs sources bibliographiques françaises et internationales disponibles sur le sujet sont présentés, ainsi que plusieurs exemples de scénarios simples ou complexes. Une méthode basée sur l'analyse fonctionnelle pour l'identification des scénarios de défaillance possibles pour une digue donnée est exposée.

Mots-clés

brèche, mécanisme, scénario, rupture, défaillance

Abstract

Flood protection levee failures (the end result of which is a breach and the resulting flooding of protected areas) are most often the consequence not of a single deterioration mechanism but of a chain of deterioration mechanisms, some of which may, depending on the conditions, take place simultaneously.

The identification of these failure scenarios is useful or even necessary to achieve different objectives:

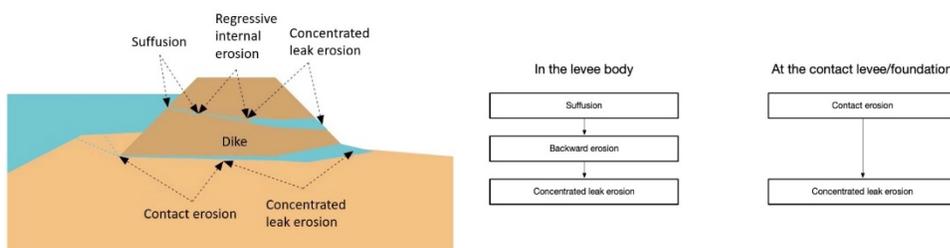
- within the framework of carrying out structural diagnosis, risk analysis, hazard study, to properly assess the performance of the levee;
- in the event of a breach in the embankment or a need for reinforcement, to best adapt the work to the mechanisms that caused or might cause the breach;
- as part of the development of methods for evaluating the probabilities of rupture, to be as consistent as possible with the reality of the phenomena and their sequences.

The classic "failure modes" (external erosion, internal erosion, erosion by overflow, sliding, hydraulic uplift of the downstream toe, etc.), which are still often considered in levee assessments, are named after a single mechanism of deterioration, in general the initiating or predominant mechanism of scenarios that can lead to failure. This practice suggests that a single mechanism is at work when a levee breaks, which often leads to errors in diagnosis and/or performance evaluation during studies conducted too quickly. Furthermore, considering the possible sequences when designing a structure can lead to a safer and/or in some cases more economical design.

In this communication, the authors develop the benefits of using a failure scenario approach. Contributions from several French and international bibliographic sources available on the subject are presented, as well as several examples of simple or complex scenarios. A method based on functional analysis for the identification of possible failure scenarios for a given dam is presented.

Key Words

breach, mechanism, scenario, failure



Deux scénarios partiels, avant le développement d'une brèche, impliquant plusieurs mécanismes d'érosion interne.

Two partial scenarios, before the development of a breach, involving several mechanisms of internal erosion

(R. Tourment, [Van M.A. *et al.* Failure paths for levees. DOI : 10.53243/R0006])

Méthodologie d'évaluation du risque d'érosion interne des barrages latéraux du Rhône

Methodology for assessing the risk of internal erosion of Rhone side dams

R. Béguin¹, R. Fellag², H. Chapuis², C. Picault²

¹ geophyConsult, Chambéry, France, remi.bequin@geophyConsult.com

² Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France, cnr.lyon@cnr.tm.fr

Résumé

La CNR gère ~400 km de barrages latéraux le long du Rhône. Ces ouvrages de grand linéaire, majoritairement soumis à une charge permanente, sont constitués de limons et graviers issus du calibrage de la retenue ou du creusement du canal de dérivation. Ils font de l'ordre d'une dizaine de mètres de haut, avec des pentes et largeurs confortables. À l'occasion du renouvellement des Études De Danger, la méthodologie d'évaluation de leur risque d'érosion interne a été modifiée pour intégrer les dernières avancées scientifiques ainsi que le retour d'expérience issu des données de surveillance accumulées depuis la mise en eau des ouvrages.

Aucune rupture n'est survenue mais des incidents ont été répertoriés, dont 49 pour lesquels une initiation d'érosion interne est suspectée. On note que 2/3 des incidents sont survenus en exploitation normale, 1/3 à la mise en eau et seulement 2 cas en crue. La suffusion et l'érosion de contact dominant (33 cas). Des cas d'érosion impliquant un ouvrage rigide sont recensés mais aucun cas d'érosion de conduit traversant l'ouvrage n'a été observé.

Six chemins d'érosion typiques ont été sélectionnés et définis par étape (localisation, initiation, filtration, progression et brèche). L'évaluation de certaines de ces étapes a nécessité d'adapter les critères de la littérature en prenant en compte le retour d'expérience historique propre à ces ouvrages particuliers (étanchéité et filtration partielle). Par exemple, vis-à-vis de l'initiation d'érosion de contact et de suffusion, bien que les graviers soient très fréquemment « instables » géométriquement et non filtrants pour les limons, l'initiation n'est constatée que dans quelques zones très localisées. L'analyse des incidents a montré que l'élément déclencheur était très probablement la présence de lentilles très perméables ($k \sim 10^{-1} \text{m/s}$) dans l'ouvrage. Vis-à-vis de l'érosion régressive de talus, on note que c'est un mécanisme important pour ces ouvrages car responsable de 4 des 6 incidents « à cinétique rapide » recensés. Les suintements en pied de digue et amorces d'érosion régressive sont fréquents sur ces ouvrages mais les critères de la littérature ne sont pas complètement satisfaisants pour distinguer les cas où cette érosion va se stabiliser de ceux où la progression risque de s'emballer.

Au final, en fonction des sections, les mécanismes identifiés comme les plus critiques sont soit i) des mécanismes à initiation probable mais à progression vers la brèche improbable (érosion de contact, suffusion), soit ii) des mécanismes à initiation improbable mais à progression vers la brèche probable (érosion de conduit).

Mots-clés

érosion interne, étude de dangers, analyse de risque, retour d'expérience, mécanismes

Abstract

CNR operates ~400 km of canal embankments along the Rhône River. These long linear structures, mostly subject to a permanent load, are constituted of silt and gravel materials resulting from the construction of the reservoir or the digging of the diversion channel. They are about ten meters high, with comfortable slopes and widths. For the last edition of the reglementary Hazard Studies, the methodology for assessing their risk of internal erosion was modified to integrate the latest scientific advances as well as the feedback from the monitoring data accumulated since their impoundment.

No failure occurred but incidents were listed, including 49 for which an initiation of internal erosion is suspected. It should be noted that 2/3 of the incidents occurred during normal operation, 1/3 during impoundment and only 2 cases during floods. Suffusion and contact erosion dominate (33 cases). Cases of erosion involving a rigid structure have been identified, but no case of erosion along a pipe crossing the structure has been observed.

Six typical erosion paths were selected and defined for the different stages of the internal erosion analysis (location, initiation, continuation, progression and breach). The evaluation of some of these stages required some adaptations of the criteria of the literature by considering the historical feedback specific to these structures (watertightness and partial filtration). For example, with respect to the initiation of contact erosion and suffusion, although gravels are frequently geometrically "unstable" and not filtering for the silts, the initiation is only observed in a few areas, very localized. The analysis of the incidents showed that the trigger was most likely the presence of very permeable lenses ($k > \sim 10^{-1} \text{m/s}$) in the structure. Considering backward erosion on the downstream slope, we note that it is an important mechanism for these structures because it is responsible for 4 of the 6 "fast kinetic" incidents identified. Seepage at the toe of the dike and the initiation of regressive erosion are frequent on these structures, but the criteria proposed in the literature are not completely satisfactory for distinguishing the cases where this erosion will stop from those where the progression is likely.

In the end, depending on the sections, the mechanisms identified as the most critical are either i) mechanisms with likely initiation but improbable progression towards the breach (contact erosion, suffusion), or ii) mechanisms with unlikely initiation but with likely progression towards the breach (piping).

Key Words

internal erosion, hazard study, risk analysis, experience feedback, mechanisms

Étude de la sensibilité à l'érosion interne
du système d'endiguement du val d'Authion via les essais HET
*Authion levee system internal erosion sensitivity study
using HET tests*

R. Béguin¹, L. Saussaye², S. Patouillard³, E. Durand⁴, B. Bridoux⁴, M. Boucher¹

¹ geophyConsult, Chambéry, France, Remi.bequin@geophyconsult.com

² Cerema, équipe de recherche ENDUSM, Blois, France, lucile.saussaye@cerema.fr

³ DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France,

sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

⁴ Cerema, Blois, France, edouard.durand@cerema.fr

Résumé

Dans le cadre du programme de fiabilisation des digues du val d'Authion, émanant de l'étude de dangers des digues du val d'Authion de 2012, un certain nombre d'études ont été produites afin de diagnostiquer puis de renforcer les levées vis-à-vis des différents mécanismes de défaillance auxquels elles sont exposées. L'un des mécanismes étudiés est l'érosion interne. La réalisation d'environ 80 essais Hole Erosion Test (HET) entre 2020 et 2022 a permis de s'intéresser spécifiquement au phénomène d'érosion de conduit pour les matériaux constituant le corps de digue et le sol de fondation des digues. L'article présente les différentes campagnes d'investigations menées et la synthèse des résultats des essais HET en termes de contrainte critique d'érosion τ_c et d'indice d'érosion I_e . Cette synthèse est conduite afin d'identifier les différentes réponses obtenues au cours des essais en fonction des structures des sols testés, ainsi que leur variabilité. Cet ensemble de données étant établi, il est comparé aux essais HET réalisés sur d'autres systèmes d'endiguement, au-delà de la Loire moyenne. Une décomposition par secteur est également proposée afin de déterminer s'il existe des tendances locales. La réflexion porte ensuite sur l'utilisation de ces données dans le cadre d'étude de diagnostic, y compris lors des études de dangers réglementaires des systèmes d'endiguement. L'utilisation des courbes de distribution cumulées de τ_c s'insère dans l'approche probabiliste requise pour ces études. Par ailleurs, les résultats des essais HET peuvent être interprétés pour évaluer la gamme de taille de défauts pouvant initier une érosion de conduit en fonction des crues ainsi que le temps de rupture d'une levée (ouverture de brèche). Les calculs tiennent compte des sollicitations hydrauliques appliquées aux levées, notamment des charges et des gradients hydrauliques, et des paramètres physiques et mécaniques des sols, dont leur sensibilité à l'érosion de conduit.

Mots-clés

diagnostic, érosion interne, érosion de conduit, contrainte critique d'érosion, indice d'érosion

Abstract

Following 2012 Authion levee system hazards study, a reliability improvement program has been put in place. Thus, several assessment studies and works enable to reinforce levees against failure mechanisms were ordered. On Loire levees, one significant mechanism is internal erosion. Between 2020 and 2022, 80 Hole Erosion Tests (HET) were made on Authion system to better understand concentrated leak erosion susceptibility of levee core and foundation materials. This article reminds Authion geotechnical surveys and HET methodologies and summarizes their results in terms of critical erosion stress τ_c and erosion index I_e . It shows results variability as function of levee layers (core or foundation), nature of material and testing difficulties and compares these results to contractor national HET database on levee systems, outside center Loire levees context.

The influence of tested samples localization on HET results is also reviewed. The next paragraph is dedicated to HET results usage in levee assessment studies including required levee systems hazards studies. Then, τ_c cumulative distribution curves are described and fit to probabilistic approaches suggested by current French hydraulic structures regulations. Additionally, HET results can be used to determine size range of defects leading to erosion initiation according to flood events and levee breach opening duration. Calculations are function of hydraulic exposures on levees, especially hydraulic charges et gradients but depend also of physical and geotechnical soil characteristics including HET ones.

Key Words

diagnosis, internal erosion, concentrated leak erosion, critical erosion stress, erosion index

Étude paramétrique de l'érosion de surface d'un sol à l'aide des dispositifs HET et EFA

Parametric study of soil surface erosion using HET and EFA devices

S. Youssef¹, N. Benahmed¹, S. Nicaise¹, P. Philippe¹, A. Bennabi², A. Poupardin²

¹ INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France,
shadi.youssef@inrae.fr

² Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité,
ESTP, Cachan, France, abennabi@estp-paris.eu

Résumé

Le phénomène d'érosion présente le risque prédominant pour les structures hydrauliques en terre. Selon les statistiques, environ la moitié des ruptures de barrage sont dues à l'érosion par surverse lors d'inondations. Cependant, même en l'absence d'inondations, une proportion similaire de ruptures de ces ouvrages résulte des écoulements d'infiltration et de l'érosion interne subséquente, qui est caractérisée par un détachement et un transport des particules de sol à travers le remblai ou sa fondation par l'écoulement de l'eau. La vulnérabilité à l'érosion est connue comme étant dépendante de plusieurs facteurs liés aux propriétés du sol. Cette étude a examiné différents facteurs liés au sol pouvant influencer la résistance à l'érosion de mélanges argile/sable grossier, et plus spécifiquement : la teneur en eau, le degré de compactage, la fraction de fines et la forme des particules grossières. Deux types d'essai d'érosion, le Hole Erosion Test (HET) et l'Erosion Function Apparatus (EFA), ont été réalisés sur des échantillons de densités, fractions argileuses et teneurs en eau variables. Ces deux érodimètres sont connus comme des méthodes simples et économiques pour déterminer l'érodabilité, c'est-à-dire la sensibilité d'un sol à l'érosion. En utilisant une loi d'érosion préalablement développée et couramment utilisée, appelée loi de contrainte de cisaillement en excès, les paramètres d'érosion issus des essais HET et EFA ont été analysés en détail afin d'établir une corrélation avec plusieurs propriétés du sol et de comparer entre eux les résultats fournis par les deux appareils. Les résultats ont montré que les pourcentages d'argile inférieurs à 50% accentuent fortement l'érodabilité des mélanges étudiés et que l'augmentation de la teneur en eau induit une légère augmentation de la résistance à l'érosion, mais aussi de la cinétique d'érosion. Les résultats HET ont indiqué une augmentation de la résistance à l'érosion avec le taux de compactage, tandis que les résultats EFA ont montré une insensibilité à ce paramètre. En ce qui concerne l'effet de la forme des particules grossières (sable d'Hostun, sable de Loire, billes de verre), les résultats ont révélé deux conclusions contre-intuitives : les particules arrondies confèrent une meilleure résistance contre l'initiation de l'érosion mais, une fois l'érosion amorcée, elles favorisent une cinétique plus rapide.

Mots-clés

érosion interne, *Hole Erosion Test*, *Erosion Function Apparatus*, sols cohésifs, propriétés du sol, paramètres d'érosion

Abstract

The erosion phenomenon poses a significant and predominant risk to earthen hydraulic structures. It involves the detachment of soil particles, which are then transported by the flow of water. According to statistics, approximately half of dam failures are caused by overflow erosion. Surprisingly, even in the absence of floods, a similar proportion of failures result from infiltration flow and subsequent internal erosion. Internal erosion is the primary cause of failure in earthen hydraulic structures, such as embankment dikes and dams, and is linked to the infiltration flows that detach and transport soil particles through the embankment or its foundation. The vulnerability to erosion is known to depend on several factors related to soil and erosion fluid properties. This study examined various soil-related factors that could influence the erodibility of clay/coarse soil mixtures, specifically water content, compaction degree, fines fraction, and the shape of coarse particles. Two types of tests, the Hole Erosion Test (HET) and the Erosion Function Apparatus (EFA), were conducted on samples with varying densities, clay fractions, and water contents. Both erodimeters appear to be simple and cost-effective methods for measuring soil resistance to erosion. Using a previously developed and commonly used erosion law, known as the excess shear-stress law, the erosion parameters from the HET and EFA tests were analyzed in detail to establish a correlation with several soil properties and to compare the results provided by the two devices. The results showed that clay percentages below 50% strongly increase the erodibility of studied mixtures. The findings reveal as well that the increase of moisture content leads to a slight increase in erosion resistance, but also in erosion kinetics. The HET results indicated an increase in erosion resistance with the increase in soil's compaction degree, while the EFA results showed an insensitivity to this parameter. Finally, as regards the effect of the coarse particles shape (Hostun sand, Loire sand or glass beads), the results revealed two counter-intuitive findings: rounded particles provide better resistance against erosion initiation, erosion threshold, but, once erosion has started, they promote faster kinetics, erosion rate.

Key Words

internal erosion, Hole Erosion Test, Erosion Function Apparatus, cohesive soils, soil parameters

**Analyse des ruptures des levées de Loire lors des crues
de la fin du XIX^e siècle**
*Analysis of the breaching of the Loire levees during the floods
of the late 19th century*

S. Patouillard¹, C. Trouillard¹, E. Durand², Y. Deniaud²

¹ DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France,
sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

² Cerema, France, edouard.durand@cerema.fr

Résumé

La vallée de la Loire possède le plus important système de levées de protection contre les inondations de France. Il comprend plus de 700 km de levées historiques, dont les premières ont été construites au Moyen Âge.

En 1846, une crue a provoqué près d'une centaine de brèches dans ces digues. En réaction, les ingénieurs mettent en place des cartes et un système d'acquisition de données avec les moyens du XIX^e siècle. Lors des crues exceptionnelles de 1856 (160 brèches) puis de 1866 (85 brèches), ces outils ont été utilisés et de nombreuses données sont disponibles en tant qu'archives historiques.

Un siècle et demi plus tard, ces archives contribuent toujours au développement de nos connaissances. Les études de dangers des levées de Loire réalisées entre 2012 et 2017 ont apporté de nouvelles informations sur les aspects géotechniques des ouvrages et de leur fondation. Ces données ont aussi été exploitées pour étudier les ruptures de digues en lien avec le développement de la géomatique et des statistiques (Halbecq 1996, Blondeau 2019). Ces approches contemporaines tentent d'expliquer la formation des brèches dans les levées de la Loire à partir de plusieurs facteurs : forme des levées et écoulement de l'eau, niveau d'eau par rapport à la crête de la digue, hauteur des levées, largeur du lit du fleuve et distance entre les levées et le chenal. Ces études apportent une meilleure compréhension du phénomène comme : la prédominance de la rupture par surverse lors de ces événements ou le taux de 10 à 20 % pour les ruptures où l'érosion interne serait le facteur déterminant.

L'objet de cet article est d'abord de rappeler les caractéristiques des 3 grandes crues de la fin du XIX^e siècle, d'ensuite proposer une méthode d'analyse des ruptures de digues et enfin de présenter comment cette méthode peut être adaptée pour intégrer ces facteurs. Les premiers résultats de ces approches sont partagés avec pour finalité d'aider à la qualification du risque actuel sur les grands systèmes de digues de protection tels que ceux de la Loire. En conclusion, sont également proposées des perspectives de développement et d'amélioration de la méthode d'exploitation de ces données d'accidentologie.

Mots-clés

brèches, digues, XIX^e siècle, données

Abstract

The Loire valley has the largest system of flood defences in France. It includes more than 700 km of historic levees, the first of which were built in the Middle Ages.

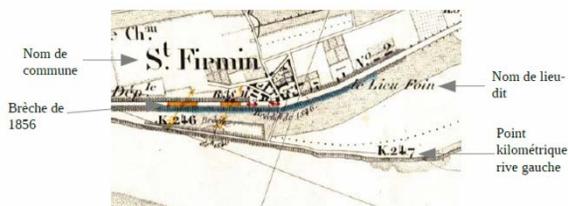
In 1846, a flood caused almost a hundred breaches in these levees. In response, engineers set up maps and a data acquisition system using 19th century resources. During the exceptional floods of 1856 (160 breaches) and 1866 (85 breaches), these tools were used and a large amount of data is available as a historical archive.

A century and a half later, these archives are still contributing to the development of our knowledge. The hazard studies of the Loire levees carried out between 2012 and 2017 have provided new information on the geotechnical aspects of the structures and their foundations. These data have also been used to study levee failures in conjunction with the development of geomatics and statistics (Halbecq 1997, Blondeau 2019). These contemporary approaches attempt to explain the formation of breaches in the Loire levees on the basis of several factors: the shape of the levees and water flow, the water level in relation to the crest of the levee, the height of the levees, the width of the river bed and the distance between the levees and the channel. These studies provide a better understanding of the phenomenon, such as the predominance of failure by overtopping during these events, or the 10-20% rate of failure where internal erosion is the determining factor.

The purpose of this article is first to review the characteristics of the 3 major floods of the late 19th century, then to propose a method for analysing dyke failures and finally to present how this method can be adapted to incorporate these factors. The initial results of these approaches are shared with the aim of helping to qualify the current risk on major protection levees systems such as those on the Loire. In conclusion, prospects for developing and improving the method for using this breaches data are also proposed.

Key Words

Breach, levees, 19th century, data



Année	Nombre de brèches (m)	Pourcentage correspondant (%)	Longueur moyenne des brèches (m)
1846	113	30,05	164,3
1856	157	41,76	174,22
1866	106	28,19	126,15
Total	376	100	

Extrait de la carte n° 30 de 1850 surchargée après la crue de 1866 et exemple de tableau d'exploitation de la base de données (longueurs moyennes de brèches).

Extract from map n° 30 of 1850 overloaded after the flood of 1866 and example of a table for using the database (average breach lengths).

**Relation entre paléo-chenaux et processus d'érosion interne
dans les sols de fondation des digues de protection**
*Relationship between paleo-channels and internal erosion processes
in dike foundations*

L. Girolami^{1,2}, S. Bonelli¹, R. Valois³, N. Chaouch¹, J. Burgat¹, F. Nicoleau⁴

¹ INRAE Aix-Marseille Université UMR RECOVER, Aix-en-Provence, France,
laurence.girolami@inrae.fr

² GéHCO, Campus Grandmont, Université de Tours, Tours, France,
laurence.girolami@univ-tours.fr

³ INRAE Université de Avignon UMR EMMAH, Avignon, France,
remi.valois@univ-avignon.fr

⁴ SMBVA, Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly, Saint-Paul de Fenouillet,
France, digues.agly@gmail.com

Résumé

Ce travail porte sur les mécanismes physiques à l'origine des processus d'érosion interne dans les sols de fondation des digues de protection contre les inondations. La présence de matériaux perméables est le plus souvent associée à la présence d'une paléo-vallée comblée de sédiments alluviaux sous le lit de la rivière et sous les digues ou de paléo-chenaux sableux pouvant s'étendre au niveau du val protégé. Le cas des digues de l'Agly montre que plusieurs processus d'érosion interne doivent être pris en compte pour décrire ces phénomènes : l'érosion régressive, l'érosion de contact et la suffusion. L'utilisation combinée des méthodes d'induction électromagnétique (EMI) et de tomographie de résistivité électrique (ERT) est une solution rapide et peu coûteuse qui permet d'imager le sol et de fournir la géométrie des différentes couches. Combinées à des sondages carottés, les résultats obtenus permettent de localiser la profondeur des interfaces et de mettre en évidence plusieurs scénarii possibles d'apparition de résurgences, de sand-boils et de fontis en bordure de digue, ou au niveau du val protégé.

Mots-clés

digues fluviales, observation, paléo-vallée, paléo-chenaux, sols de fondation, érosion interne, résurgences, sand-boils, fontis, méthodes géophysiques, carottes sédimentaires

Abstract

This work focuses on the mechanisms that trigger internal erosion in the pervious foundation of flood protection dikes. Permeable layers are most often due to the presence of a paleo-valley filled with alluvial sediments beneath the river bed and dikes as well as paleo-channels that can extend into the protected area. The case of the Agly dikes exposes that several internal erosion processes should be considered to describe these phenomena: backward erosion piping, contact erosion and suffusion. The combined use of electromagnetic induction (EMI) and electrical resistivity tomography (ERT) is a fast and low-cost solution that allows imaging the soil and providing the geometry of the different layers. Combined with coring, the results obtained allow to locate the depth of the interfaces and to highlight several possible scenarios of appearance of resurgence, sand-boils and fontis at the edge of the dike, or at the level of the protected valley.

and electrical resistivity tomography (ERT) methods is a fast and cheap solution that allow to image the subsoil and to provide the geometry of the different layers. Combined with sediment cores, results obtained allow to determine the position of interfaces and to highlight several scenarios for the appearance of leaks, sand boils, and sinkholes at the vicinity of the dikes, or in the subsoil of the protected area.

Key Words

River dikes, observation, paleo-valley, paleo-channels, foundation soils, internal erosion, geophysical methods, leaks, sand-boils, sinkholes, sediment cores

**Approche pour estimer la probabilité que l'érosion interne
initie une brèche à travers une digue, appliquée aux digues
à faciès hétérogènes sur des linéaires importants**

***Approach to estimate the probability that internal erosion will initiate
a breach through an embankment applied to levees with important linear
and heterogeneous facies***

C. Chancel¹, R. Canac¹

¹ ARTELIA, Echirolles, France, chloe.chancel@arteliagroup.com,
robin.canac@arteliagroup.com

Résumé

L'érosion interne des remblais ou de leurs fondations est reconnue comme l'une des principales causes de rupture des digues. Malheureusement, il s'agit d'un mode de défaillance qui ne peut pas être systématiquement analysé à l'aide de formules empiriques ou de modèles numériques. L'estimation du risque de rupture de digue par érosion interne est ainsi particulièrement complexe lorsqu'elle doit être effectuée sur des linéaires d'ouvrages importants, aux profils géométriques variables et aux constitutions hétérogènes. Cette problématique a été étudiée dans le cadre des études de danger du système d'endiguement des digues du Drac et de l'Isère, dans la ville de Grenoble, entretenu par le SYMBHI (Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère) et EDF (Électricité de France).

L'objectif de l'étude présentée est de définir les niveaux de sûreté et de dangers des digues du système d'endiguement, pour lesquels la probabilité de rupture de la digue par érosion interne reste inférieure respectivement à cinq et cinquante pourcents, conformément aux exigences de la réglementation française.

Les matériaux constituant les digues sont issus de formations alluvionnaires, composées majoritairement de graves et de sables aux granulométries étalées, avec des passages limoneux rencontrés localement. L'identification de l'ensemble des configurations géotechniques potentiellement sensibles à l'érosion interne se trouve ainsi particulièrement complexe à réaliser sur l'ensemble du linéaire des digues (environ 36 km).

Afin de répondre aux difficultés posées par l'hétérogénéité des digues et le linéaire important à étudier, la méthodologie adoptée a dans un premier temps permis :

- d'élaborer une approche empirique spécifique pour estimer la probabilité que l'érosion interne initie une brèche ;
- de concentrer l'analyse détaillée de l'érosion interne sur une pré-sélection de secteurs potentiellement critiques vis-à-vis de ce mode de rupture.

Un modèle probabiliste a ainsi été développé sur la base de la prise en compte du retour d'expérience de la mise en charge permanente d'une partie des digues du système d'endiguement. Une fonction reliant différentes valeurs de gradient hydraulique à des valeurs de probabilité de rupture par érosion interne a été élaborée.

Les gradients hydrauliques ont ensuite été calculés sur l'ensemble des profils du système d'endiguement pour les différents scénarios de crues à considérer. L'application du modèle

probabiliste à l'ensemble des gradients calculés a permis de réaliser une pré-sélection des secteurs potentiellement sensibles au risque d'érosion interne.

Les secteurs sélectionnés ont enfin fait l'objet d'une analyse détaillée afin d'affiner la probabilité de défaillance due à l'érosion interne.

Mots-clés

érosion interne, digue, défaillance, risque, probabilité

Abstract

Internal erosion in embankments and their foundations is the main cause of levee failures. Unfortunately, this potential failure mode cannot be easily analyzed using numerical equations or models and the associated risk is difficult to quantify. This issue was studied within the hazard studies of the Drac river levees system in Grenoble city in France, maintained by the SYMBHI (Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère) and EDF (Electricité de France) as part of the new French "levees" regulation of 2015. These systems are composed of about 36 kilometers of embankments. The protected area by these systems covers an area of 53 km², where 580 000 people live.

To evaluate the probability of failure of the levees system due to internal erosion mechanisms, a probabilistic model was developed based on an empirical approach combining a back-analysis of levees behaviour during the impoundment of part of the levees system and the probability assessment proposed by Vick (2002). This approach allowed the definition of the hydraulic gradient used to evaluate the probability of failure. The need for such method was motivated by the important levee linear to be studied (about 36 km) and the heterogeneous facies of the levees system due to the successive construction stages and the heterogeneities of the foundation materials. Indeed, this heterogeneity makes the deterministic approach illusory. This approach allowed to identify seven critical sections regarding internal erosion and to associates a failure probability for different flood situations (Q50, Q100 & Q200).

Key Words

internal erosion, embankment, failure, risk, probability

**Proposition d'une démarche pour évaluer le risque d'érosion interne
d'une digue fluviale : Étude paramétrique hydraulique**
*Proposal for an approach to assess the risk of internal erosion in a river
levee: Hydraulic parametric study*

D. Ayssami¹, S. Hemmati¹, C. Chevalier¹, Y. Boussafir¹, P. Reiffsteck¹

¹ GERS-SRO, Univ Gustave Eiffel, F-77420 Champs-sur-Marne, France,
dalia.ayssami@univ-eiffel.fr

Résumé

L'érosion interne est un phénomène complexe qui demeure l'une des raisons les plus fréquentes de la rupture des digues fluviales et des barrages en terre. Pour essayer de comprendre les phénomènes en jeu, on a choisi d'analyser le comportement d'une digue à remblai multicouche, où l'érosion peut avoir lieu du fait de variations de certaines propriétés du sol comme la perméabilité, la porosité, la capacité de rétention d'eau, etc.

Les cas modélisés ont été inspirés de la digue de La Ville-aux-Dames (Indre-et-Loire, 37), sur la base des résultats d'essais de Fugro. Les variations imposées dans le modèle ont été basées sur les données des pénétromètres statiques transformées en profils de densité relative à l'aide de l'approche de Baldi *et al.*. À partir d'un même matériau, les propriétés initiales de chaque couche ont été variées, et les vitesses d'écoulement et les pressions interstitielles ont été étudiées en fonction de différents jeux de paramètres influençant ce phénomène d'érosion. L'équation de Richards est utilisée pour décrire l'écoulement dans un sol non saturé, et la loi de van Genuchten pour les milieux poreux. Le modèle de digue a été décomposé en plusieurs zones en appliquant un chargement hydraulique simulant une crue. Le choix a été fait d'adopter un calcul stationnaire, en fixant le niveau de la charge hydrostatique côté protégé correspondant à la hauteur initiale de la nappe, et côté eau correspondant au niveau de la crue. Les paramètres utilisés sont issus d'essais réalisés au laboratoire sur un sol composé d'un mélange de limon silteux et de 10 % de kaolinite. L'analyse de ces résultats, a permis de localiser les zones de faiblesse telles que zones lâches, décomprimées, et où les vitesses d'écoulement sont élevées (des écoulements de fuite qui sont souvent locaux et qui peuvent traverser le remblai ou la fondation), et peuvent être à l'origine de mécanismes d'érosion interne.

En conclusion, cette communication présente une analyse détaillée de l'influence des variations des propriétés du sol sur l'écoulement hydraulique au sein d'une digue fluviale. Il souligne également l'importance de prendre en compte ces variations dans la conception et la gestion des digues afin de prévenir les problèmes d'érosion interne et de garantir leur performance à long terme.

Mots-clés

érosion interne, digues, modèle numérique, sol non saturé, étude paramétrique

Abstract

Internal erosion is a complex phenomenon that remains one of the most frequent causes of failure in river levees and earthen dams. To attempt to understand the underlying mechanisms, we chose to analyze the behavior of a multilayer embankment dam, where erosion can occur due to variations in certain soil properties such as permeability, porosity, water retention capacity, etc.

The modeled cases were inspired by the “La Ville-aux-Dames” dike (Indre-et-Loire, France), based on Fugro’s test results. The variations imposed in the model were based on static cone penetration test data transformed into relative density profiles using the approach by Baldi *et al.*. Starting with the same material, the initial properties of each layer were varied, and the flow velocities and interstitial pressures were studied as a function of different parameter sets that can induce erosion.

The Richard equation was used to describe the flow in unsaturated soil, and the van Genuchten model for porous media. The dam model was divided into several zones by applying a hydraulic load simulating a flood. A steady-state calculation was adopted, with the downstream hydrostatic load corresponding to the initial groundwater level and the upstream load corresponding to the flood level. The parameters used were obtained from laboratory tests on a soil composed of a mixture of silty loam and 10% kaolinite.

The analysis of these results allowed for the identification of weak zones such as loose and decompressed areas, where flow velocities are high (resulting in localized seepage that can traverse the embankment or foundation) and can contribute to internal erosion mechanisms.

In conclusion, this paper presents a detailed analysis of the influence of soil property variations on hydraulic flow within a river levee. It also underscores the importance of considering these variations in the design and management of levees to prevent internal erosion problems and ensure long-term performance.

Key Words

internal erosion, dikes, numerical model, unsaturated soil, parametric study

Les essais d'érosion interne et externe en géotechnique *Internal and external erosion tests in geotechnics*

S. Nicaise¹, D. Jacqueline², S. Bonelli¹

¹ INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France,
sylvie.nicaise@inrae.fr

² Cerema, Rouen, France, delphine.jacqueline@cerema.fr

Résumé

L'érosion des sols, qu'elle soit interne au sol ou externe au sol, est le mécanisme majeur à l'origine des désordres ou des ruptures d'ouvrages de génie civil dès que le sol constituant l'ouvrage ou sa fondation est en contact avec de l'eau en mouvement : barrages de stockage, barrages latéraux et canaux, digues fluviales de protection contre les inondations, mais également ponts, protections de berges et ouvrages de stabilisation du trait de côte. L'érosion externe est le plus souvent abordée aux grandes échelles spatiales sous l'angle de l'hydrologie et de la géomorphologie, ou à une échelle inférieure, sous l'angle de l'hydraulique. Bien que présente dans les milieux naturels, l'érosion interne est surtout étudiée dans le cadre des ouvrages hydrauliques (digue, barrage). Pourtant, tandis qu'elle s'est approprié le sujet, la géotechnique considère encore l'érosion comme une question particulière : peu abordée dans les manuels pédagogiques de Mécanique des Sols, peu présente dans la liste traditionnelle des essais de géotechniques. Cette communication ambitionne de délivrer une partie significative du regard scientifique et technique français actuel sur l'érosion interne et externe des sols, sans prétendre être exhaustif sur un thème aussi ancien, multidisciplinaire, et toujours débattu, mais en s'appuyant sur les groupes de travail internationaux afférents du Club Européen de la CIGB. On privilégie un angle d'approche relatif aux essais de laboratoire et aux essais in situ existants dans le cadre des ouvrages hydrauliques, avec un triple objectif de cohérence, de pédagogie et d'information. La cohérence est nécessaire pour que soient considérés, dans ces essais, l'écoulement et le sol, avec le même niveau de description par rapport à l'état de l'art. La pédagogie est requise pour que l'ingénieur puisse s'approprier les possibilités offertes par les essais disponibles avec le même niveau d'exigence en hydraulique et en géotechnique par rapport à l'état des connaissances. L'information concerne ici l'état des pratiques : on propose une liste des essais d'érosion interne et externe existants, utilisés depuis 10 à 20 ans pour les projets ou les vérifications des ouvrages hydrauliques, dont quelques-uns sont normalisés ou en cours de normalisation. Cette liste contient notamment des informations d'usage pratiques relatives aux processus d'érosion considérés et au type de résultats attendus.

Mots-clés

érosion interne, érosion externe, essais de laboratoire, digues

Abstract

Soil erosion, whether internal or external to the soil, is the major mechanism responsible for damage or failure of civil engineering structures whenever the soil constituting the structure or its foundation is in contact with moving water: storage dams, side dams and canals, river dikes for flood protection, but also bridges, bank protection and coastline stabilization structures. External erosion is most often approached on large spatial scales from the angle of hydrology and geomorphology, or on a smaller scale, from the angle of hydraulics. Although present in natural environments, internal erosion is mainly studied in the context of hydraulic structures (dikes, dams). Yet, while the subject has been appropriated, geotechnical engineering still considers erosion to be a special issue: little addressed in Soil Mechanics teaching manuals, little present in the traditional list of geotechnical tests. This paper aims to present a significant part of the current French scientific and technical view of internal and external soil erosion, without claiming to be exhaustive on such an old, multi-disciplinary and still debated topic, but drawing on the relevant international working groups of the ICOLD European Club. The focus is on laboratory and in-situ tests for hydraulic structures, with a threefold objective of coherence, education and information. Consistency is necessary to ensure that both flow and soil are considered in these tests, with the same level of description in relation to the state of the art. Pedagogy is required so that engineers can appropriate the possibilities offered by the available tests with the same level of requirement in hydraulics and geotechnics compared to the state of the art. The information provided here concerns the state of the art: we propose a list of existing internal and external erosion tests, used over the last 10 to 20 years for projects or for verifying hydraulic structures, some of which have been standardized or are in the process of being standardized. The list includes practical information on the erosion processes considered and the type of results expected.

Key Words

internal erosion, external erosion, laboratory tests, dikes

Risque d'érosion externe des digues maritimes en remblai : principaux résultats du projet Polder2C's, essais grandeur nature, campagnes de reconnaissances et modélisations numériques
Embankment coastal dikes' external erosion failure risk: main results from Polder2C's project, large scale tests, surveys, and numerical modelling

**C. Alléon¹, N. Nerincx², P. Peeters³, G. De Backer⁴,
P. Sergent⁵, C. Fauchard⁶, A. Bennabi⁷, H. Smaoui⁵, S. Kaidi⁵**

¹ ISL Ingénierie, Lille, France, alleon@isl.fr

² DN&T, Liège, Belgique, nerincx@dn-t.be

³ DMOW, Gand, Belgique, patrik.peeters@mow.vlaanderen.be

⁴ Flanders Hydraulics, Anvers, Belgique, waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

⁵ Cerema Risque Eau et Mer, Margny lès Compiègne, France,
philippe.sergent@cerema.fr

⁶ Cerema, Equipe recherche EDNSUM, cyrille.fauchard@cerema.fr

⁷ ESTP Paris - Ecole Spéciale des Travaux Publics, abennabi@estp-paris.eu

Résumé

Le projet Polder2C's a été lancé en décembre 2019 par 12 – aujourd'hui 13 – partenaires avec pour ambition principale d'améliorer la connaissance du risque d'érosion externe pour les digues estuariennes et maritimes en remblai. Grâce à une zone dédiée, des essais grandeur nature de surverse et de franchissement ont été réalisés sur les digues du polder Hedwige et Prosper, à la frontière belgo—néerlandaise, le long de l'Escaut.

En parallèle, plusieurs partenaires ont développé des modèles numériques de différentes natures pour décrire et comprendre les phénomènes en jeu. Ces modélisations se sont appuyées sur des campagnes de reconnaissances géotechniques, géophysiques, et des essais de laboratoire, qui ont été conduits dans le cadre du projet.

Le papier présente des éléments de conclusion issus des différentes campagnes menées et propose des liens entre les essais in situ, les essais de laboratoire et les modélisations, ainsi qu'une réflexion globale sur la résistance à l'érosion externe des remblais. Une introduction à un outil numérique pour estimer le risque d'érosion externe de digues soumises au risque de franchissement, développé dans le cadre du projet, est finalement proposée.

Ce projet a bénéficié du soutien financier du programme 2014-2020 d'Interreg2mers, co-financé par le Fond Régional Européen de Développement sous le contrat de subvention [2S07-023].

Mots-clés

digues, érosion externe, Polder2C's, essais, modélisation

Abstract

The Polder2Cs project started in December 2019 with 12 (now 13) partners willing to increase the knowledge about external erosion of maritime and estuary dikes. Thanks to a dedicated playground, large scale overflow and overtopping experiments have been carried out on the Hedwige and Prosper polder, at the Belgian – Netherlands border, along the river Scheldt.

Meanwhile, several partners developed numerical models aiming to understand the physical phenomenon. Those modelling exercises are supported by extensive geotechnical and geophysical investigations along with laboratory tests.

The paper presents the conclusions of different experiments carried on site and in laboratory, and discusses links between site, lab tests and models about external erosion of dikes. An opening on a simplistic numerical tool to assess external erosion failure under overtopping is finally presented.

This project has received funding from the Interreg 2 Seas programme 2014-2020 co-funded by the European Regional Development Fund under subsidy contract No [2S07-023].

Key Words

dikes, external erosion, Polder2C's, surveys, modelling

Évaluation de l'érodabilité de la rehausse fusible d'un déversoir de la Loire moyenne par essais d'érosion à jets mobiles

Erodibility assessment of one spillway's earthen fuseplug in the middle Loire using mobile jets erosion tests

L. Saussaye¹, C. Chevalier², S. Patouillard³, E. Durand⁴, B. Bridoux⁴

¹ Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France, [lucile.saussaye@cerema.fr](mailto:Lucile.saussaye@cerema.fr)

² GERS-SRO, Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne, France, christophe.chevalier@univ-eiffel.fr

³ DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France, sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

⁴ Cerema, Blois, France

Résumé

Les systèmes d'endiguement de la Loire moyenne sont équipés de déversoirs, mis en place suite aux grandes crues du XIX^e siècle. Ce sont des structures particulières permettant de contrôler l'entrée de l'eau dans la zone protégée lors des crues et limiter la charge sur les ouvrages plus à l'aval. En ce sens, ce sont des structures clé de la stratégie de lutte contre les inondations. Certains déversoirs sont équipés d'une rehausse ou « banquette fusible » en terre dont l'objet est de retarder le déclenchement de l'entrée d'eau jusqu'à produire un effet de chasse qui permettrait d'écarter la crue. Le diagnostic d'un déversoir de ce type inclut le diagnostic de la rehausse, initialement fusible. Dans le cadre du diagnostic de 3 déversoirs sur 2 systèmes d'endiguement de la Loire moyenne, à Jargeau, Montlivault et Blois (déversoir de la Bouillie), la sensibilité à l'érosion in situ de leur rehausse est évaluée avec des essais de type Mobile Jets Erosion Test (MoJET), qui permettent de tester le sol en place avec la possibilité de répéter l'essai. L'appareil MoJET se compose notamment d'une partie mécanique active, l'unité d'érosion, équipée de 6 buses projetant des jets d'eau de 0,5 mm de diamètre perpendiculairement à la surface du sol. Ces 6 jets d'eau tournent pendant l'essai. L'effluent chargé de sol érodé est recueilli à différents pas de temps pendant les 12 minutes que dure l'essai. La masse de sol sec, c'est-à-dire la masse de sol érodée, en fonction du temps est utilisée pour évaluer qualitativement l'érosion. Dans cet article, les essais effectués pour vérifier la fusibilité réelle de la rehausse du déversoir de Jargeau sont présentés. Les essais MoJET sont réalisés sur plusieurs profils et à différentes profondeurs afin d'analyser la variabilité des résultats obtenus. Les résultats sont analysés au regard des caractéristiques physiques des sols (teneur en eau, analyse granulométrique et valeur au bleu du sol) et de leur compacité, évaluée par des mesures de densité in situ au densitomètre à membrane et/ou par des sondages au pénétromètre dynamique léger. La présence d'une couche de terre végétale, herbacée, sur le fusible, limite l'érodabilité des matériaux meubles qui le constituent (érosion externe). Sous cette surface végétalisée, la rehausse est plus ou moins érodable en fonction de la profondeur (érosion interne), amenant une réflexion sur son efficacité et sur le maintien des conditions de fusibilité de ce composant particulier des déversoirs.

Mots-clés

déversoir, rehausse, fusible, érodabilité, essai MoJET

Abstract

The levees systems of the Middle Loire are equipped with spillways, installed following the major floods of the 19th century. These structures are designed to control the entry of water into the protected area during floods and limit the load on downstream structures. Some spillways are equipped with an earthen "fuseplug", to delay the onset of water inflow until a flushing effect is produced. Diagnosis of a spillway includes diagnosis of the earthen fuseplug. As part of the diagnosis of 3 spillways on 2 dike systems of the Middle Loire, at Jargeau, Montlivault and Blois (Bouillie spillway), the sensitivity of their spillway to in situ erosion is assessed using Mobile Jets Erosion Test (MoJET). The MoJET apparatus comprises an active mechanical part, the erosion unit, equipped with 6 nozzles projecting jets of water 0.5 mm in diameter perpendicular to the surface of the soil. These 6 water jets rotate during the test. The effluent loaded with eroded soil is collected at different time steps during the 12-minute test. The mass of dry soil, *i.e.* the mass of eroded soil, as a function of time is used to qualitatively assess erosion. In this article, the tests carried out to verify the actual fusibility of the bank of the Jargeau spillway are presented. The MoJET tests were carried out on several profiles and at different depths in order to analyse the variability of the results obtained. The results are analysed in terms of the physical characteristics of the soils (moisture content, particle size distribution, and soil methylene blue value) and their compactness, assessed by in situ density measurements using a membrane densitometer and/or a light dynamic penetrometer. The presence of a layer of herbaceous topsoil on the fuseplug limits the erodibility of the loose materials which it is made of (external erosion). Under this vegetated surface, the fuseplug is more or less erodible depending on the depth (internal erosion), leading us to reflect on its effectiveness and on maintaining the conditions of collapsibility of this particular component of the spillways.

Key Words

spillway, bank, fuseplug, erodibility, MoJET

Résistance à la surverse - Essais in situ *Resistance to overflow- Field tests*

**S. Nicaise¹, C. Picault², N. Chaouch¹, F. Byron¹, Y. Grémeaux¹, A. Doghmane¹,
F. Crampette³, F. Golay⁴, S. Bonelli¹**

¹ INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France,
sylvie.nicaise@inrae.fr

² CACOH, CNR, Lyon, France, C.PICAULT@cnr.tm.fr

³ Génie Civil, CNR, Villeneuve-lez-Avignon, France, F.CRAMPETTE@cnr.tm.fr

⁴ IMATH, Université de Toulon, Toulon, France, frederic.golay@univ-tln.fr

Résumé

Pour quantifier l'hydraulique et la résistance d'un sol à l'érosion causée par la surverse de digues en remblais, INRAE a développé en 2015 un dispositif de terrain basé sur la norme ASTM-D6460. Deux essais ont été réalisés en mai 2022 sur un barrage latéral de la Compagnie Nationale du Rhône de 6,2 m de haut à Montfaucon (Gard), avec des débits compris entre 13 et 140 l.s⁻¹ par mètre linéaire (hauteur d'eau en crête de 4 à 18 cm). Le premier essai a été réalisé sur le sol intact, recouvert d'un enherbement naturel, dans un canal de 1 m de large et de 25 m de long, en 12 étapes de 30 minutes (6 heures d'écoulement au total, vitesse maximale d'écoulement 4.0 m.s⁻¹, contrainte établie 20 Pa). Aucune érosion significative de l'enherbement naturel n'a été observée. Un affouillement d'environ 1,10 m de profondeur et de 4 m³ a été créé dans la recharge en graviers en pied de digue. Le second essai a été réalisé sur le sol découpé du couvert végétal afin d'étudier la résistance du sol du talus, constitué de limon sableux compacté en partie haute et de sable graveleux en partie basse, dans un canal de 60 cm de large et de 20 m de long, en 9 paliers de 30 min (4,5 heures d'écoulement au total, vitesse maximale d'écoulement 2,6 m.s⁻¹, contrainte établie 110 Pa). Le limon compacté a été érodé sur quelques centimètres par l'écoulement de surface. Le sable graveleux a été érodé dès 5,7 cm de hauteur d'eau en crête, ce qui a conduit à une érosion sur 10 m de long, d'une profondeur maximale de 1,30 m et d'une largeur maximale de 1,80 m, soit 9 m³ de sol érodé. Un profil 3D réalisé par Lidar montre que cette érosion est assimilable à la formation d'un début de brèche (approfondissement). Les enseignements sont les suivants : i) toutes ces observations n'étaient a priori pas prévisibles à partir des essais d'érosion précédemment réalisés en laboratoire et in situ (essais d'érosion Jet et HET) ; ii) la remarquable résistance de l'enherbement naturel ; iii) l'intérêt des essais de surverse, permettant de quantifier les écoulements en termes de vitesses et contraintes, et d'érosion.

Mots-clés

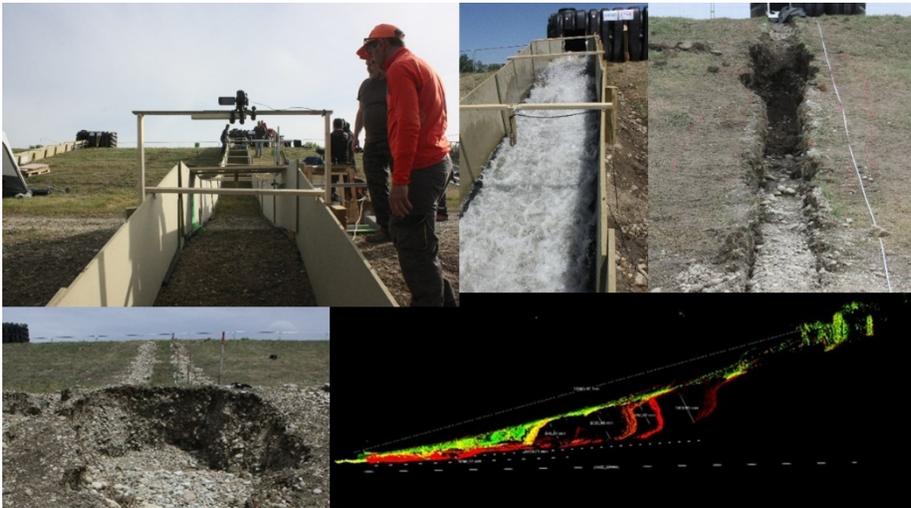
surverse, érosion, essai in-situ, digue, remblai

Abstract

To quantify hydraulics and resistance to erosion caused by the overflowing of levees, INRAE developed a field test device in 2015, based on the ASTM-D6460 standard. Two field tests were carried out in May 2022 on a 6.2 m-high CNR (Compagnie Nationale du Rhône) canal embankment at Montfaucon (Gard), with flows ranging from 13 to 140 l.s⁻¹ per meter (water height at crest ranging from 4 to 18 cm). The first test was carried out on an intact soil, covered with natural grass, in a channel 1 m wide and 25 m long, in 12 stages of 30 min (6 hours of flow in total, maximum flow velocity 4.0 m.s⁻¹, established stress 20 Pa). No significant erosion of the natural grass cover was observed. A scour approximately 1.10 m deep and 4 m³ in volume was observed in the gravel fill at the bottom of the embankment. The second test was carried out on a soil stripped of vegetation cover to investigate the strength of the slope soil, consisting of compacted sandy silt at the top and gravelly sand at the bottom, in a channel 60 cm wide and 20 m long, in 9 stages of 30 min (4.5 hours of flow in total, maximum flow velocity 2.6 m.s⁻¹, established stress 110 Pa). The compacted silt was eroded over a few centimeters by the surface flow. The gravelly sand was eroded from 5.7 cm water depth at the crest, leading to erosion over a 10 m length, with a maximum depth of 1.30 m and a maximum width of 1.80 m, representing 9 m³ of eroded soil. A 3D Lidar profile shows that this erosion can be linked to a breach starting process (deepening). The findings are as follows: i) all these observations were not foreseeable from erosion tests previously carried out in the laboratory and in situ (Jet and HET erosion tests); ii) the remarkable resistance of the natural grass cover; iii) the value of overflow tests, enabling flows to be quantified in terms of velocities and stresses, and erosion.

Key Words

overflow, erosion, in-situ test, dike, embankment



Essais de surverse in situ en mai 2022 (Montfaucon)
In situ overflow tests in May 2022 (Montfaucon)

Retour d'expérience sur l'instrumentation des levées de Loire *Feedback on the Loire levees instrumentation*

L. Saussaye¹, Y. Boussafir², S. Patouillard³

¹ Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France, lucile.saussaye@cerema.fr

² Université Gustave Eiffel, GERS/SRO, Marne-la-Vallée, France,
yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr

³ DREAL Centre-Val de Loire, SEBRINAL/DETL, Orléans, France,
sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

Résumé

Les références sur l'instrumentation des digues de protection sont relativement rares comparées à celles concernant les barrages et plus généralement la géotechnique. Les opérations de travaux de fiabilisation des systèmes d'endiguement de la Loire moyenne ont amené une réflexion sur l'opportunité de mettre en place des dispositifs d'auscultation sur certains tronçons de digues afin de répondre à plusieurs enjeux : s'assurer globalement de la pérennité des ouvrages, surveiller l'évolution du comportement d'une digue vis-à-vis du changement climatique et assurer la surveillance des ouvrages dans différentes situations. L'article s'appuie sur 4 cas documentés dans les départements d'Indre-et-Loire et de Loir-et-Cher :

- la mise en place d'un suivi de la perméabilité de la levée de Veuves (pour la pérennité de la solution de confortement de corps de digue par tranchée de sol mixé et durabilité du matériau sol-ciment) ;
- le suivi de la durabilité du matériau sol-ciment dans l'écran étanche de la levée de Tours Loire amont à Montlouis-sur-Loire ;
- l'instrumentation d'une recharge aval de digue à La Riche pour l'observation de son comportement vis-à-vis de son environnement afin d'adapter la conception de tels ouvrages au changement climatique ;
- la perspective d'instrumentation dans la levée de La Riche (pour la surveillance en crue).

Pour chacun de ces cas, les auteurs présentent le contexte et la mise en œuvre de l'instrumentation, les caractéristiques des différents équipements (essais, forages, capteurs, sondes, piézomètres, caméras) et protocoles de suivi. Même si l'utilité des cas présentés n'est pas remise en cause, l'opportunité de l'instrumentation est questionnée au regard des limites liées aux dimensions des ouvrages (plusieurs dizaines de kilomètres) et aux échelles de temps considérées (plusieurs centaines d'années). La conclusion met l'accent sur les perspectives de développement des dispositifs d'instrumentation des digues qui font appel à l'inventivité tout en gardant une certaine humilité compte tenu de ces limites.

Mots-clés

digue, instrumentation, perméabilité, capteur, piézomètre

Abstract

There are relatively few references on the instrumentation of protective dykes compared with dams and, more generally, geotechnical engineering. Work to improve the reliability of diking systems on the Middle Loire has led to consideration of the advisability of installing monitoring systems on certain sections of dike in order to address a number of issues: the durability of reinforcement works, changes in the behaviour of a dike in the face of climate change, and flood monitoring of works. The article is based on 4 documented cases in the Indre-et-Loire and Loir-et-Cher departments:

- monitoring the permeability of the Veuves levee (to ensure the long-term viability of the solution of reinforcing the body of the dyke using a mixed soil trench and the durability of the soil-cement material);
- monitoring the durability of the soil-cement material in the watertight screen of the Tours Loire upstream levee at Montlouis-sur-Loire;
- instrumentation of a downstream dyke recharge at La Riche to observe its behaviour in relation to its environment, with a view to adapting the design of such structures to climate change;
- the prospect of instrumentation in the La Riche levee (for flood monitoring).

For each of these cases, the authors present the context and implementation of the instrumentation, the characteristics of the various pieces of equipment (tests, boreholes, sensors, probes, piezometers, cameras) and the monitoring protocols. Although the usefulness of the cases presented is not called into question, the appropriateness of instrumentation is questioned in the light of the limitations associated with the size of the structures (several tens of kilometres) and the time scales considered (several hundred years). The conclusion emphasises the prospects for developing instrumentation systems for dykes, which call for inventiveness and a certain humility given these limitations.

Key Words

levee, instrumentation, permeability, sensor, piezometer

Évaluation des protections en enrochements :
inspection visuelle et diagnostic
Assessment of riprap protection: visual inspection and diagnosis

M. Darbot¹, M. Dumas², V. Fuchs³

¹ Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France, M.DARBOT@cnr.tm.fr

² Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France, M.DUMAS@cnr.tm.fr

³ Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France, V.FUCHS@cnr.tm.fr

Résumé

Les aménagements de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) sont en service depuis 30 à 70 ans. CNR exploite près de 400 km d'endiguements le long du Rhône répartis entre les retenues et les canaux d'amenée. Les enrochements mis en place sur une bonne partie des digues et berges du Rhône aménagées ont subi tout au long de cette période des agressions d'origine hydraulique (courant, batillage et houle) et météorologique (gel, ensoleillement, ...).

Il était donc nécessaire d'examiner, avec des méthodes homogènes d'évaluation et de dimensionnement, l'état de ces protections. Ces protections en enrochements ont été conçues et réalisées sur une durée totale de 40 ans, avec des matériaux répondant à des normes internes de résistance mais nécessairement de qualité diverse (l'usage des matériaux des carrières proches du fleuve ayant été privilégié pour optimiser les chantiers). En effet, dans l'intérêt de garantir la qualité de ces enrochements, CNR a élaboré une procédure d'agrément de fourniture qu'elle impose aux carriers fournisseurs de ses chantiers.

La nécessité de maîtriser la sûreté des ouvrages et les opérations de maintenance a poussé CNR à engager une démarche d'études globales de diagnostic des protections en enrochements.

La méthodologie retenue consiste à déterminer la blocométrie nécessaire et suffisante des enrochements pour satisfaire aux conditions d'équilibre. Les conditions d'équilibre appliquées aux sollicitations hydrauliques du Rhône ont été fixées au travers d'une revue des pratiques internationales et des résultats d'essais en laboratoire sur modèles physiques. Trois sollicitations hydrauliques prépondérantes ont été mises en évidence : le courant naturel, le batillage et les vagues dues au vent. Un dimensionnement théorique de ces sollicitations a été entrepris. La protection en enrochements des endiguements a été évaluée à partir d'essais bolométriques in situ.

Le croisement des résultats de l'étude de dimensionnement et des résultats d'évaluation de la protection en place a abouti à l'établissement du plan pluriannuel de maintenance et de surveillance sur chaque aménagement du Rhône.

Mots-clés

enrochements, diagnostic, maintenance, vieillissement, matériaux

Abstract

Installations of the Compagnie Nationale du Rhône (CNR) have been in service for 30 to 70 years. CNR operates almost 400 km of dikes along the Rhône, divided among reservoirs and feeder canals. Throughout this period, riprap installed on the dykes and the banks of the Rhône River has been subjected to hydraulic (currents, waves, and swell) and meteorological erosion (frost, sunshine, etc.).

Therefore, it was necessary to examine the material condition of these protections, using standard assessment and sizing methods. These riprap protections were designed and built over a total period of 40 years, using equipment that met internal resistance standards, of varying quality (the use of materials from quarries close to the river having been favored to optimize work sites). To guarantee the quality of its riprap, CNR has drawn up a supply approval procedure that it imposes on the quarries that supply its worksites.

The need to ensure the safety of the structures, combined with the need to control maintenance operations, prompted CNR to undertake a comprehensive diagnostic study of the rockfill protections.

The methodology adopted consists in determining the necessary and sufficient rockfill blockometry to satisfy the balancing condition. The balancing conditions applied to the hydraulic erosion of the Rhone were determined through a review of international practices and the results of laboratory tests on physical models. A theoretical dimensioning considering natural current, wave action and wind-driven waves has been carried out. Rockfill protection of the embankments was assessed using in situ block tests.

Cross-referencing the results of the sizing study with the results of the assessment of the protection in place led to the establishment of a multi-year maintenance and monitoring plan for each Rhone facility.

Key Words

riprap, diagnostics, maintenance, ageing process, materials

**Confortement des protections anti-crues
à l'aide de palplanches en acier**
Reinforcement of flood protection barriers using steel sheet piles

B. Kullolli¹, A. Gallala¹, F. Pichoff¹, M. Gratier de Saint Louis¹

¹ Palplanches, ArcelorMittal Commercial RPS s. à r.l. - Sheet Piling, Esch/Alzette,
Luxembourg,

borana.kullolli@arcelormittal.com ;
franck.pichoff@arcelormittal.com

Résumé

Parmi les risques naturels, les crues sont des risques majeurs qui affectent chaque année des millions de personnes et causent des dommages économiques et sociaux considérables. En France, les crues représentent le premier risque naturel en termes de fréquence et de gravité et requièrent des mesures de prévention, de protection et de gestion de crise. Parmi les mesures de protection possibles, les digues permettent de réduire la vulnérabilité des zones exposées en maîtrisant les crues. La fréquence et la gravité de ces phénomènes vont s'intensifier à l'avenir en raison du dérèglement climatique. Désormais responsables des infrastructures de protection contre les inondations existantes, les collectivités territoriales françaises doivent les sécuriser afin de protéger leurs populations et d'accroître leur résilience. Entre autres solutions, les défenses contre les inondations peuvent être renforcées et surélevées à l'aide de palplanches en acier aux endroits où l'emprise des ouvrages ne peut être augmentée. Elles peuvent être utilisées comme solutions d'étanchéité et pour renforcer les digues, les protections des berges et les bassins de rétention.

Cet article présente les résultats d'une campagne d'essais de rupture de digue en grandeur nature qui a été réalisée près de la ville d'Eemdijk aux Pays-Bas. Elle vise à comprendre le comportement des digues en remblai et de celles renforcées à l'aide de palplanches acier. La robustesse accrue de la digue renforcée a permis d'éviter une rupture totale et les résultats ont montré un potentiel d'économie de 30 % sur le poids total d'acier nécessaire par rapport aux recommandations actuelles des standards Néerlandais en matière de confortement de digues, tout en garantissant le niveau de sécurité requis. La dernière partie de l'article est consacrée à une nouvelle solution technique en cours de développement, qui vise à surveiller les rideaux de palplanches afin de détecter les signes précoces de problèmes structurels. Les nombreuses données recueillies sont traitées et analysées afin de fournir des informations sur l'état et les capacités cachées des infrastructures, ce qui pourraient aider à prolonger la durée de vie d'une structure actuelle. L'utilisation de l'intelligence artificielle permet d'adopter une approche de maintenance et d'alertes prédictives.

Mots-clés

protection anti-crues, digues, palplanche, acquisition de données, surveillance

Abstract

Floods are a major natural hazard, affecting millions of people every year and causing considerable economic and social damage. In France, floods are the leading natural hazard in terms of frequency and severity, requiring prevention, protection and crisis management measures. Among the possible protective measures, dykes can reduce the vulnerability of exposed areas by containing floodwaters. The frequency and severity of these phenomena will increase in the future as an effect of climate change. Moreover, local authorities in France are now responsible for existing flood protection infrastructures and must secure them to protect their populations and improve their resilience. Among other solutions, flood defences can be reinforced and raised using steel sheet piling. They can be used as cut-off solutions and to reinforce dykes, bank protection and control basins.

This article presents the results of a full-scale dyke failure test campaign conducted near the town of Eemdijk in the Netherlands. The aim was to understand the behaviour of earthen dykes and reinforced dykes. The increased robustness of the dyke reinforced with steel sheet piles prevented a total failure, and the results showed a potential saving of 30% on the required total weight of steel compared with the current Dutch standards for dyke reinforcement, while guaranteeing the required level of safety. The final part of the article is devoted to a new technical solution currently under development, which aims to monitor sheet piling in order to detect early signs of structural problems. The extensive data collected is processed and analysed to provide information on the condition and hidden capabilities of the infrastructure, which could help extend the life of an existing structure. The use of artificial intelligence enables a predictive maintenance and alerting approach.

Key Words

flood protection, dykes, sheet piling, data acquisition, monitoring

Défaillances structurelles de digues torrentielles : retour d'expérience et perspectives de synthèse sur l'accidentologie

Structural failure of torrential dykes: feedback and perspectives on accidentology

Y. Queffélec¹, C. Misset¹, D. Kuss², M. Fouquet³, J. Palisse¹

¹Office National des Forêts - Direction Forêt & Risques Naturels, 9 quai Créqui,
38000 Grenoble, France, yann.queffelec@onf.fr

²SYMBHI, Syndicat mixte des bassins hydrauliques de l'Isère, 9 Rue Jean Bocq,
38000 Grenoble, France, damien.kuss@symbhi.fr

³Office National des Forêts – Service RTM des Hautes-Alpes, 5 Rue des Silos, 05000
Gap, France, marc.fouquet@onf.fr

Résumé

Les systèmes d'endiguement des cours d'eau torrentiels sont soumis à des phénomènes naturels violents caractérisés par un fort transport solide. Les spécificités de ces systèmes et de l'analyse des risques en contexte torrentiel ont été présentées dans une précédente communication. Nous revenons dans cet article plus en détail sur les modes de défaillances par érosions externes et leur analyse, à partir du retour d'expérience sur plusieurs cas de défaillances structurelles de digues torrentielles observées lors de crues en France. Ces exemples sont décrits succinctement afin de mettre en évidence les mécanismes caractéristiques, les observations permettant de les décrire et les données nécessaires à acquérir suite ou durant un événement, sachant qu'il est parfois difficile de déterminer le mécanisme initiateur de la rupture.

En effet, la majeure partie des connaissances sur l'accidentologie porte sur les systèmes d'endiguement fluviaux. La transposition de leurs résultats en contexte torrentiel est généralement peu pertinente du fait de nombreuses spécificités (fortes pentes, types d'écoulement, matériaux constitutifs). Par ailleurs, le contenu des analyses réalisées dans le cadre des études de danger est souvent non adapté et non proportionné au risque réellement induit par certains mécanismes. Les défaillances structurelles par érosion interne sont par exemple bien moindres en contexte torrentiel et particulièrement en bordure de torrent où ce risque est quasi-inexistant. Les érosions externes (érosions par le cours d'eau, affouillements des ouvrages ou érosion par surverse) sont de très loin celles qui prédominent en torrentiel. L'analyse des risques de défaillance devrait donc se concentrer essentiellement sur ces dernières.

À partir de ce constat, nous proposons d'engager une enquête collaborative auprès des gestionnaires de digues, bureaux d'études et autres organismes travaillant sur les systèmes d'endiguement torrentiels pour capitaliser les données accidentologiques de ces systèmes. Une fiche descriptive pour recenser les événements ayant généré une défaillance/rupture des systèmes d'endiguement torrentiels sera proposée en 2024 afin d'élaborer une base de données commune accessible à tous. L'analyse de ces données permettra à termes de fournir une synthèse statistique spécifique au contexte torrentiel sur les modes de défaillance et d'améliorer les connaissances sur les configurations les plus propices à chacun d'entre eux, sur laquelle pourront s'appuyer les bureaux d'études en charge de l'élaboration des études de danger.

Mots-clés

digues, défaillances, torrentiel, accidentologie, Retex

Abstract

Diking systems of torrential rivers are subject to violent natural phenomena characterized by high levels of sediment transport. The specific features of these systems and of risk analysis in a torrential context were presented in a previous paper. In this article, we take a closer look at failure modes caused by external erosion and their analysis, based on feedback from several cases of structural failure of torrential dykes observed during floods in France. These examples are described briefly in order to highlight the characteristic mechanisms, the observations that can be used to describe them and the data that need to be acquired following or during an event, bearing in mind that it is sometimes difficult to determine the mechanism that initiated the failure.

Most of what is known about accidentology relates to lowland river diking systems. The transposition of their results to the torrential context is generally not very relevant due to numerous specificities (steep slopes, types of flow, constituent materials). In addition, the content of the analyses carried out as part of the hazard studies is often inappropriate and not proportionate to the risk actually induced by certain mechanisms. Structural failure due to internal erosion, for example, is much less probable in torrential context, and particularly on the banks of torrents, where this risk is virtually non-existent. External erosion (erosion by the watercourse, scouring of structures or erosion by overflow) is by far the most prevalent process in torrential environments. Risk analysis should therefore focus on it.

Based on this observation, the authors propose to initiate a collaborative survey for dyke managers, design offices and other organisations working on torrential diking systems in order to capitalise on accident data for these systems. A descriptive form will be proposed in 2024 to list events that led to the failure/rupture of torrential diking systems, in order to create a common database available to everyone. The analysis of this dataset will eventually provide a statistical summary of failure modes specific to the torrential context and improve our knowledge about the configurations leading to a given failure mode. Such informations will be useful for design offices responsible for drawing up hazard studies.

Key Words

dykes, failures, torrential, accidentology, feedback

**Modélisation numérique de la suffusion
basée sur les données expérimentales**
Numerical simulation of suffusion based on experimental data

R. Gelet¹, A. Kodieh¹, D. Marot¹, N.-S. Nguyen¹

¹ Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183,
Saint-Nazaire, France, rachel.gelet@univ-nantes.fr

Résumé

Les phénomènes d'érosion interne sont à l'origine de nombreuses instabilités, voire des ruptures d'ouvrages hydrauliques en terre (digues et barrages). Parmi les quatre phénomènes d'érosion interne qui peuvent être distingués, la suffusion apparaît comme l'un des plus complexes. Elle résulte en effet du couplage de trois processus : le détachement de particules fines, le transport de celles-ci et la filtration d'une partie des particules fluidisées. Au fur et à mesure du développement de ces processus, la porosité et donc la conductivité hydraulique du sol vont évoluer. L'écoulement au cœur du sol va ainsi évoluer à son tour. La sollicitation hydraulique et la réponse du sol face à cette sollicitation sont donc fortement couplées. À l'échelle des ouvrages, de par ce couplage et à cause de la forte hétérogénéité des sols constituant lesdits ouvrages ou leurs fondations, il est nécessaire de développer des outils numériques pour quantifier la suffusion et ses conséquences sur le comportement hydromécanique des sols. Suivant cet objectif, un modèle est développé en utilisant la théorie des mélanges, appliquée au sol qui est discrétisé en deux phases (solide, fluide) chacune d'elles composée par deux espèces (grains non érodables et particules érodables, eau et particules fluidisées). En se basant sur les mesures et observations expérimentales, la suffusion est modélisée par l'échange de masse entre les phases solide et fluide. Cet échange de masse est modélisé suivant deux approches : l'une basée sur la puissance dissipée par le fluide et la seconde sur l'énergie dissipée. Le couplage hydromécanique est représenté par un modèle poro-élastique classique. Il importe de noter que l'ensemble des paramètres utilisés est mesurable lors d'essais de suffusion. Le modèle est résolu numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis et plusieurs simulations sont réalisées. Six échantillons constitués d'un même sol sont testés expérimentalement, suivant différents chemins de chargement hydraulique. La calibration du modèle numérique est réalisée à l'aide des mesures du premier essai. Le modèle est ensuite utilisé pour simuler les cinq autres essais, ainsi que pour simuler un essai mené à l'aide d'un modèle physique de digue. La comparaison des données numériques avec les mesures expérimentales montre un bon accord, particulièrement en termes de masse érodée cumulée et de distribution spatiale finale de fines.

Mots-clés

érosion interne, suffusion, éléments finis, approche énergétique,
simulation, modèle physique

Abstract

Internal erosion phenomena are the cause of many instabilities, even failures of hydraulic earth-structures (dykes and dams). Among the four internal erosion phenomena that can be distinguished, suffusion appears to be one of the most complex. It results from the coupling of three processes: the detachment of fine particles, their transport and the filtration of a part of the fluidized particles. As these processes develop, the porosity and therefore the hydraulic conductivity of the soil will change. The hydraulic load will thus evolve in turn. The hydraulic load and the response of the soil to this load are therefore strongly coupled. At the structure scale, because of this coupling and due to the strong heterogeneity of the soils constituting these structures or their foundations, numerical tools need to be developed to quantify suffusion and its consequences on the hydromechanical behavior of soils. Following this objective, a model is developed within the framework of the mixture theory, in which the soil is discretized into two phases (solid, fluid) each of them composed of two species (non-erodible grains and erodible particles, water and fluidized particles). Based on experimental measurements and observations, suffusion is modeled by the mass exchange between the solid and fluid phases. This mass exchange is modeled using two relations: one based on the power dissipated by the fluid and the second on the cumulative dissipated energy. The hydromechanical coupling is represented by a classical poro-elastic model. It is important to note that all the used parameters can be measured during suffusion tests. The model is solved numerically using the finite element method and several simulations are carried out. Six samples made of the same soil are tested experimentally, following different hydraulic loading paths. The calibration of the numerical model is carried out using the measurements of the first test. The model is then used to simulate the five other tests, as well as to simulate a test conducted on a physical model of a dike. The comparison of the numerical data with the experimental measurements shows good agreement, particularly in terms of cumulative eroded mass and final spatial distribution of fines.

Key Words

internal erosion, suffusion, finite elements, energy-based approach, simulation, physical model

Nouveau dispositif pour l'étude de la suffusion suivants différents états mécaniques

New device for the study of suffusion under several stress states

D. Marot¹, B. Oli¹, R. Gelet¹, F. Bendahmane¹

¹ Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183,
Saint-Nazaire, France, didier.marot@univ-nantes.fr

Résumé

Les instabilités et les ruptures que peuvent subir les digues et les barrages en remblais sont très majoritairement dues aux processus d'érosion externe (surverse) et d'érosion interne (renard hydraulique, érosion régressive, érosion de contact ou suffusion). Cette étude porte sur la suffusion qui peut mobiliser la fraction fine de sols pulvérulents ou faiblement cohésifs. Ce processus complexe combine trois mécanismes : le détachement, le transport et l'éventuelle filtration des particules fines. De nombreux critères ont été proposés dans la littérature, pour caractériser la susceptibilité à la suffusion, en considérant uniquement la distribution granulométrique et éventuellement la densité du sol. Toutefois, plusieurs études ont montré que l'initiation et le développement de la suffusion dépendent aussi du chemin de chargement hydraulique. Par ailleurs, chacun des trois mécanismes susmentionnés dépend du chargement mécanique subi par le sol.

Dans ce contexte, un dispositif expérimental a été développé afin de caractériser la sensibilité vis-à-vis de la suffusion, de quatre sols pulvérulents à distribution lacunaire (composé de sable et de gravier), en contrôlant l'état mécanique et le chemin de chargement hydraulique. Les essais sont réalisés à l'aide du banc triaxial dédié qui permet d'appliquer à l'échantillon (diamètre : 100 mm ; hauteur : 200 mm) un écoulement vertical descendant. La charge hydraulique appliquée est augmentée automatiquement, par faibles incréments et suivant le même chemin pour tous les essais. Les échantillons sont tous consolidés sous une même contrainte effective moyenne, mais la valeur du déviateur de contrainte est propre à chaque essai. Enfin des essais sont menés en conditions œdométriques. L'interprétation des évolutions de conductivité hydraulique et de taux d'érosion permet tout d'abord d'identifier 4 étapes successives : initiation, filtration, débouillage et état permanent caractérisant la fin du processus de suffusion. Chacune de ces étapes est ensuite étudiée à l'aide de différentes méthodes interprétatives. À la fin de chaque essai, les échantillons sont découpés en 4 couches afin de mesurer les évolutions de distribution granulométrique.

Les résultats obtenus soulignent la présence d'écoulements préférentiels circonférentiels pour l'essai réalisé en conditions œdométriques, ce qui conduit à une légère surestimation de la sensibilité à la suffusion. En conditions triaxiales, l'influence sur la suffusion du déviateur de contrainte apparaît limitée, notamment en regard de l'influence du pourcentage de sable. Enfin la confrontation de ces résultats montre que contrairement à l'approche énergétique, l'approche en conductivité hydraulique ne permet pas de détecter toutes les étapes pour tous les essais.

Mots-clés

suffusion, état mécanique, gradient hydraulique, puissance, énergie

Abstract

Dikes and dams can be subjected to instabilities and failures which are mainly due to external erosion (overtopping) and internal erosion processes (concentrated leak erosion, backward erosion, contact erosion and suffusion). This study deals with suffusion which can mobilize the fine fraction of cohesionless or low cohesive soils. This complex process combines three mechanisms: detachment, transport and possible filtration of the fine particles. Numerous criteria have been proposed in the literature to characterize the suffusion susceptibility, by only considering the grain size distribution and possibly the density. However, several studies show that the initiation and the development of suffusion also depend on the hydraulic loading path. Moreover, all aforementioned mechanisms depend on the mechanical state applied on the soil.

In this context, an experimental apparatus was developed to characterize the suffusion susceptibility of four cohesionless gap-graded soils (composed by sand and gravel) under controlled stress states and a controlled hydraulic loading path. A vertical downward flow is applied to each specimen (diameter: 100 mm, height: 200 mm) thanks to a modified triaxial bench. The applied head is progressively increased by small increments and the same hydraulic load is applied for all realized tests. Specimens are all consolidated under the same mean effective stress but under various values of deviatoric stress. Finally, several specimens are tested in oedometric conditions. By following the time evolutions of the hydraulic conductivity and the erosion rate, it is possible to distinguish 4 successive steps: initiation, self-filtration, blow-out and steady state which characterizes the end of the suffusion process. Each step is characterized with different interpretative methods. At the end of each test, the specimen is cut in 4 slices to measure post-suffusion gradations.

The results highlight the presence of circumferential flow paths in oedometric conditions, which leads to a slight overestimation of the suffusion susceptibility. In triaxial testing conditions, the influence of the stress state on the suffusion appears limited, in particular when considering the effect of the percentage of sand. The comparison of these results shows that, in contrast to the energy-based approach, the hydraulic-conductivity-based approach doesn't permit the detection of all steps for all performed tests.

Key Words

suffusion, stress state, hydraulic gradient, power, energy

Le projet Overcome : comprendre et modéliser les processus d'érosion par surverse des digues et barrages en remblai constitués de matériaux grossiers à granulométries étalées

The Overcome project: understanding and modelling overflowing erosion processes in levees and embankment dams constituted of gap-graded coarse materials

**J.-R. Courivaud¹, L. del Gatto¹, K. El Kadi Abderrezzak²,
C. Picault³, M. Morris⁴, S. Bonelli⁵**

¹ EDF-CIH, La Motte Servolex, France, jean-robot.courivaud@edf.fr

² EDF R&D LNHE, Chatou, France, kamal.el-kadi-abderrezzak@edf.fr

³ CNR-CACOH, Lyon, France, c.picault@cnr.tm.fr

⁴ HR Wallingford, Oxfordshire, UK, m.morris@hrwallingford.com

⁵ INRAE, Aix-en-Provence, France, stephane.bonelli@inrae.fr

Résumé

La prédiction de l'érosion par surverse des digues de protection contre les crues et des barrages en remblai constitue l'une des difficultés majeures dans l'analyse de la sûreté de ces ouvrages. Bien qu'identifié comme étant le mécanisme de rupture dominant de près de la moitié des ruptures de digues fluviales, les méthodes et outils dont disposent les ingénieurs pour le caractériser, de manière déterministe, restent encore très limités. Notamment, la caractérisation du processus d'érosion, en termes géométriques et temporels, prenant en compte le comportement des matériaux constitutifs du remblai et de sa fondation et les spécificités des sollicitations hydrauliques sur les digues, n'est encore à la portée d'aucun outil de modélisation numérique validé au niveau requis. Les ingénieurs doivent donc, pour l'instant, se contenter d'approches recourant largement à l'empirisme : critères dits « de jugement d'expert » ou formules empiriques. Ces approches très simplifiées sont connues pour présenter de fortes incertitudes et ne pas garantir des résultats systématiquement du côté de la sécurité. C'est dans le but final d'améliorer significativement la robustesse et la précision des outils de prédiction de l'érosion par surverse pour les ingénieurs, qu'EDF et CNR ont décidé de lancer le projet de recherche Overcome. L'objectif de ce projet est d'inclure au sein de la plateforme numérique open source TELEMAT-2D des modules représentant différents types de processus physiques en lien avec les ruptures par surverse de digues, basés sur une approche expérimentale multi-échelles très poussée. Cette communication présente les tout premiers résultats de l'un des premiers sujets investigués par ce projet : la description des mécanismes physiques d'érosion par surverse des remblais constitués de sol grossiers à granulométrie étalée. Ces sols sont présents dans une grande partie des digues situées en zones montagneuses ou dans les vallées situées juste en aval. Une première série d'essais de surverse à petite échelle a été menée au laboratoire de l'Université Polytechnique de Madrid, en réalisant des remblais homogènes de 55 cm de hauteur à partir de trois matériaux différents : un sable assez uniforme, un gravier de granite et un sol alluvionnaire à granulométrie étalée, issu du site CNR de Montfaucon. Si les essais avec le remblai en sable ont confirmé le mécanisme attendu d'érosion de surface, il a été assez surprenant de voir des différences significatives de mécanisme d'érosion entre les matériaux de Montfaucon et

graviers de granite. Dans le matériau de Montfaucon, le mécanisme s'apparente à de l'érosion de surface, tandis qu'avec le gravier de granite, le mécanisme d'érosion débute avec du « Headcut migration » puis évolue à la fin en érosion de surface. Par ailleurs, le sol de Montfaucon s'est avéré quatre fois moins érodable que le gravier de granite. Ces premiers résultats appellent à être confirmés par des essais de répétabilité à petite échelle et des essais à plus grande échelle.

Mots-clés

surverse, érosion externe, matériaux grossiers, modélisation, essais expérimentaux

Abstract

Predicting overflowing erosion of levees and embankment dams is one of the major difficulties in assessing the safety of these structures. Although it has been identified as the main failure mechanism in almost half of all levee failures, the methods and tools available to engineers to characterize it deterministically are still very limited. In particular, no numerical modelling tool validated to the required level is yet available to characterize the erosion process in geometric and temporal terms, taking into account the behavior of the soil material constituting the embankment and its foundation and the hydraulic loadings specific to levees. For the time being, therefore, engineers have to make do with empirical approaches: so-called "expert judgement" criteria or empirical formulae. These highly simplified approaches are known for their high discrepancies and their inability to guarantee systematically conservative results. It was with the ultimate aim of significantly improving the robustness and accuracy of overflowing erosion prediction tools for engineers that EDF and CNR decided to launch the Overcome research project. The aim of this project is to include, within the TELEMAC-2D open-source digital platform, modules representing different types of physical processes associated with levee overflowing, based on a highly advanced multi-scale experimental approach. This paper presents the very first results of one of the first subjects investigated by this project: the description of the physical mechanisms of overflowing erosion of embankments constituted with coarse gap-graded soils. These soils are found in a large proportion of levees located in mountain areas or in valleys just downstream. An initial series of small-scale overflow tests was carried out in the laboratory of the Polytechnic University of Madrid, using homogeneous embankments 55 cm high constituted with three different materials: fairly uniform sand, granite gravel and alluvial coarse gap-graded soil from the CNR site at Montfaucon. While the tests with the sand embankments confirmed the expected surface erosion mechanism, it was quite surprising to see significant differences in the erosion mechanism between the Montfaucon and granite gravels materials. In the Montfaucon material, the mechanism resembles surface erosion, whereas with the granite gravel, the erosion mechanism begins with "headcut migration" and then evolves into surface erosion. In addition, the Montfaucon soil proved to be four times less erodible than the granite gravel. These initial results need to be confirmed by additional small-scale repeatability tests and larger-scale tests.

Key Words

overflowing, external erosion, coarse materials, modelling, laboratory testing

Comportement hydromécanique à long terme
d'un sol traité prélevé dans un remblai
Long-term behaviour of a treated soil sampled in an embankment

N. Chabrat^{1,2}, O. Cuisinier¹, F. Masrouri¹

¹Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, Nancy, France

²Ginger CEBTP, Élancourt, France, Nicolas.Chabrat@univ-lorraine.fr

Résumé

Le traitement à la chaux et/ou au ciment est une solution courante pour améliorer les performances mécaniques des sols fins utilisés pour les digues. Le traitement permet notamment de réduire fortement la susceptibilité des sols argileux au phénomène de retrait et de gonflement. Toutefois, si de nombreuses études en laboratoire ont été réalisées concernant les sols traités, la question de leur évolution *in situ* n'a été que très peu considérée. Dans ce contexte, des prélèvements ont été réalisés dans un remblai expérimental construit en 2010. Ce remblai est constitué d'une argile A4 (ou F4) traitée dès sa mise en place à la chaux et/ou au ciment.

Les propriétés hydromécaniques des matériaux prélevés entre la bordure et le cœur du remblai ont été déterminées pour mettre en évidence l'impact des sollicitations environnementales. Les résultats montrent que les matériaux situés au cœur du remblai ont un comportement mécanique similaire à celui du sol traité en laboratoire après une cure de 180 jours. En revanche, une dégradation progressive des propriétés mécaniques du matériau a été mise en évidence en s'approchant de la partie externe du remblai. Les propriétés mécaniques des matériaux prélevés dans la partie externe étaient équivalentes à celles du sol non traité.

Les analyses physico-chimiques (mesure du pH, analyse thermogravimétrique) du sol en bordure ont mis en évidence les phénomènes responsables de la dégradation des effets du traitement : le lessivage partiel du traitement, la carbonatation des composés cimentaires présents dans le sol, ainsi que les cycles répétés de séchage et d'humidification du sol.

Cette étude multi-échelles montre que les performances d'un sol argileux traité sont susceptibles d'évoluer dans le temps sous l'effet des conditions environnementales. L'importance de cette évolution dépend fortement de la position de ce sol au sein de l'ouvrage.

Mots-clés

traitement de sol, durabilité, sols expansifs, comportement hydromécanique, aspects physicochimiques

Abstract

Treatment with lime and/or cement treatment is a common solution to improve the mechanical performance of fine soils in dykes. The treatment significantly reduces the shrinkage and swelling effect of clayey soils. However, while numerous laboratory studies have been conducted on treated soils, their *in-situ* evolution has been largely overlooked. In this context, samples were taken from an experimental embankment constructed in 2010. This embankment consists of lime and/or cement-treated applied to a high plasticity clay placed during construction.

The hydromechanical properties of the materials sampled from the edge to the core of the embankment were determined to highlight the impact of environmental exposition. The results show that the materials located in the core of the embankment exhibit mechanical behavior similar to laboratory-treated soil after a curing period of 180 days. However, a progressive decrease of the mechanical properties of the material was observed as it approached the outer part of the embankment. The mechanical properties of the materials sampled from the exterior of the structure were found to be equivalent to those of untreated soil. Physico-chemical analyses (pH measurement, thermogravimetric analysis) of the soil at the edge revealed the phenomena responsible for the degradation of treatment effects: partial leaching of the cementitious products, carbonation of the treatment, as well as repeated drying and wetting cycles.

This multi-scale study shows that the performance of a treated clayey soil is likely to evolve over time under the influence of environmental conditions. The significance of this evolution strongly depends on the position of the soil within the structure.

Key Words

soil treatment, durability, expansive soils, hydromechanical behaviour,
physico-chemical features

Évolution des performances de digues traitées à la chaux en climat méditerranéen

Performance trends for lime-treated dikes in a Mediterranean climate

**S. Nicaise¹, F. Klotz², F. Bertola², F. Byron¹, N. Chaouch¹, Y. Grémeaux¹,
J. Aubriet¹, T. Ozturk², A. Doghmane¹, S. Bonelli¹**

¹ INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France,
sylvie.nicaise@inrae.fr

² Lhoist, Nivelles, fabien.klotz@lhoist.com

Résumé

L'intérêt des sols traités à la chaux pour la construction ou le renforcement de digues a été démontré au travers de plusieurs projets de recherche : le traitement permet d'utiliser les sols locaux, les propriétés mécaniques et la résistance à l'érosion sont améliorées par rapport au sol non traité. Le comportement vis-à-vis de l'érosion en particulier permet au concepteur de proposer un nouveau design d'ouvrage, économe en solutions de renforcement classiques.

Dans ce contexte, le Bulletin ICOLD n°195 Cemented Soil Dams a été finalisé en 2022, de façon à encadrer le traitement de sol dans les ouvrages hydrauliques. Dans ses annexes, le bulletin présente plusieurs retours d'expériences ; l'évolution des propriétés du sol traité dans le temps reste toutefois un sujet peu documenté.

La littérature contient plusieurs références d'études à moyen et long terme vérifiant le maintien des performances acquises par le traitement. La plupart ont été menées en laboratoire, quelques-unes sur des ouvrages réels, très peu contiennent des données concernant la résistance à l'érosion.

Les campagnes d'essais menées en 2021 et 2023 sur les sites expérimentaux DigueELITE et Salin de Giraud, cinq ans après leur construction, apportent des éléments. De précédentes publications ont présenté le gain de résistance à l'érosion de surverse des deux ouvrages, par rapport au témoin en sol non traité construit en même temps.

Des essais d'érosion in-situ de type JET ont été menés sur les deux sites, ainsi que des prélèvements de matériaux intacts pour compléter les données au laboratoire par des essais d'érosion de conduit (HET) ainsi que des caractérisations chimiques.

Sur les deux ouvrages soumis aux conditions environnementales pendant plus de 5 ans, en particulier à un climat chaud et sec, les performances de résistance à l'érosion des sols traités sont supérieures à celles du sol non traité. Les caractérisations chimiques montrent une interaction sol-atmosphère sur une profondeur inférieure à 20 cm, expliquant la légère perte de performance en surface.

Mots-clés

digue, traitement, chaux, érosion, durabilité

Abstract

Several research projects have demonstrated the benefits of lime-treated soils for the construction or reinforcement of dikes. This treatment allows the use of local soils and it improves the mechanical properties and the erosion resistance compared to untreated soil. In particular, the enhanced erosion resistance enables designers to propose new structural designs.

In this context, ICOLD Bulletin n°195 “Cemented Soil Dams” was finalized in 2022 to establish a framework for soil treatment in hydraulic works. The bulletin includes various case studies in its appendices. However, the long-term evolution of treated soil properties remains an insufficiently documented subject.

The literature contains several references to medium and long-term studies confirming that the performance acquired through treatment endures over time. Most of these studies were conducted in laboratories, with a few on actual structures, and only few of them include data on erosion resistance.

The test campaigns carried out in 2021 and 2023 at the DigueELITE and Salin de Giraud experimental sites, five years after their construction, provide some information. Previous publications have demonstrated that both structures offer greater resistance to overflow erosion than untreated soil.

In-situ JET erosion tests were carried out at both sites, along with sampling of intact materials to complement laboratory data with HET tests and chemical characterization.

On both structures which have been exposed to environmental conditions for over five years, in particular a hot and dry climate, the erosion resistance performance of the treated soils was superior to that of the untreated soil. Chemical characterizations reveal soil-atmosphere interaction within depth lower than 20 cm, explaining the slight loss of performance at the slope surface.

Key Words

levee, treatment, lime, erosion, sustainability

Thème 5

Reconnaitances, surveillance, auscultation, diagnostic, des digues, aménagements hydrauliques et ouvrages associés (aide à la décision 1 - ouvrages)

Comité scientifique

Animateurs des relectures et de la session orale

Sérgio Palma-Lopes

Université Gustave Eiffel

Patrick Soulat

Suez

Relecteurs

Florent Bacchus

PoNSOH

Yasmina Boussafir

Université Gustave Eiffel

Laurent Peyras

INRAE

Eric Vuillermet

BRLi

**Études de dangers des systèmes d'endiguement –
Vers un outil modulaire CAROHL de Calcul de l'Aléa Rupture
des Ouvrages Hydrauliques Linéaires**
*Levees hazards studies – Toward a modular tool CAROHL
for hydraulic linear structures breach hazard calculation*

E. Durand¹, B. Bridoux¹, L. Saussaye¹

¹ Cerema, Blois, France, edouard.durand@cerema.fr

Résumé

L'évaluation de la sûreté des ouvrages hydrauliques en France est un enjeu national relevant de la politique de prévention et de lutte contre les inondations. Une nouvelle réglementation sur les ouvrages hydrauliques a introduit en 2007 la notion d'étude de dangers des digues. Dans ce cadre, la méthodologie et l'outil de calcul de l'aléa rupture de digue, CARDigue, ont été développés entre 2008 et 2011 par la DREAL Centre-Val de Loire, le Cerema et l'Inrae pour l'aide à la réalisation, de façon homogène, des études de dangers des digues de la Loire moyenne et ses affluents. Depuis 2011, l'outil a été employé sur 42 systèmes d'endiguement ligériens et les demandes d'utilisation de CARDigue en dehors du contexte Loire se sont accrues. Cela a permis d'avoir un retour d'expérience de son utilisation et d'envisager des améliorations. Sur la même période, des progrès scientifiques majeurs ont été faits sur la connaissance des mécanismes à l'origine des ruptures d'ouvrages hydrauliques. Le Cerema envisage donc le développement d'un nouvel outil modulaire, CAROHL, qui permettra aux bureaux d'études de créer et d'analyser des scénarios de rupture propres au système d'endiguement étudié, à l'aide de modules de mécanisme élémentaire (surverse, érosion interne, érosion externe, glissement, soulèvement hydraulique) mis à disposition dans l'outil et combinés entre eux. L'outil pourra ainsi s'adapter à chaque système d'endiguement, ce que ne permet pas aujourd'hui l'outil CARDigue, qui ne caractérise que les mécanismes et scénarios de rupture affectant les digues de la Loire moyenne.

Le présent article présente les principes de fonctionnement de ce nouvel outil innovant CAROHL, au stade actuel de démonstrateur, et son domaine d'application. Il décrit les améliorations apportées par rapport à CARDigue et illustre sa modularité avec la possibilité de création de nouveaux mécanismes et modules élémentaires afin de s'adapter aux scénarios de défaillance de chaque système d'endiguement.

Mots-clés

digue, étude de dangers, aléa de rupture, évaluation, sûreté

Abstract

In France, levees safety assessment is a national issue supported by prevention and fight against inundation politics. In 2007, a new regulation about hydraulic structures (levees and dams) was voted and a decree made levees hazards studies mandatory. In these circumstances, DREAL CVL (state regional owner of central Loire levees), and two contractors Cerema and Inrae developed from 2008 to 2011 a new methodology and tool, CARDigue, for Loire levees breach hazards calculation. Since 2011, CARDigue has been used on the 42 central Loire levee systems by contractors and then standard hazard studies were conducted. Widely, the use of CARDigue out of Loire context has increased and a feedback on its utilization has pointed out necessity of methodology and tool improvements. At the same time, major scientific advances had been done on mechanisms which are the cause of levee breaches. Thus, Cerema has laid the foundation a new modular tool development, CAROHL, that will enable contractors to create and analyze suitable linear hydraulic structure breach scenarios using provided elementary mechanisms modules combination (overflowing, external and internal erosion, scour, slope sliding, uplift). Therefore, CAROHL will be able to suit all levee systems, what CARDigue can't do since the tool utilization is restricted to 5 identified Loire levee system breach scenarios.

This article presents scope and operation principles of the new and innovating demonstrator tool CAROHL. It describes improvements compared to first tool CARDigue and underlines its adaptability and possibilities to create and combine new modules to fit each levee system failure modes.

Key Words

levee, hazard study, breach hazard, assessment, safety

Proposition d'une méthode pour évaluer les probabilités de défaillance des digues fluviales basée sur l'élicitation, l'agrégation et la réduction des biais du jugement d'expert (leCAD)

Proposal of a method for assessing river levee failure probabilities based on elicitation, aggregation and reduction of expert judgment bias (leCAD)

M. Vuillet¹, C. Carvajal², L. Peyras², M. Hathout^{1,2}, Y. Diab³

¹Lab'Urba, École des ingénieurs de la ville de Paris/
Université Gustave Eiffel/Paris-Est, Paris, France, marc.vuillet@eivp-paris.fr

²INRAE, Aix-Marseille université, UMR RECOVER Aix en Provence, France,
claudio.carvajal@inrae.fr

³Lab'Urba, Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne, France
youssef.diab@univ-eiffel.fr

Résumé

La réglementation relative à la sûreté des digues de protection contre les inondations requiert la réalisation de diagnostics périodiques et d'études de danger intégrant l'évaluation probabiliste des niveaux de sûreté des ouvrages. Ce type d'approches quantitatives pose des problèmes scientifiques et techniques considérables pour les grands linéaires de digues. En premier lieu, on manque souvent de connaissances sur les conditions physiques déclenchantes des mécanismes de rupture. Si le mécanisme de glissement bénéficie d'une définition et caractérisation de l'état limite suffisamment précise pour permettre le calcul d'une probabilité de défaillance par des approches quantitatives, cela est plus complexe pour les mécanismes de surverse, d'érosion interne et d'affouillement : état de l'art en cours d'élaboration et de stabilisation, manque données statistiques, etc. En outre la variabilité des natures et propriétés des matériaux constitutifs des ouvrages pose également des problèmes d'incertitudes. Aussi le jugement expert joue un rôle important dans l'évaluation de la fiabilité des digues. Plusieurs experts et plusieurs domaines peuvent être mobilisés : géotechnique, génie civil, hydraulique fluviale, morphodynamique, etc. Il apparaît alors nécessaire de doter les ingénieurs de démarches et d'outils permettant d'explicitier leurs raisonnements, l'élicitation de probabilités dans un contexte de manque de connaissance, de déterminer et le cas échéant de limiter la manifestation de biais cognitifs. Très fréquents lors d'évaluations expertes, ces biais correspondent à des distorsions entre la façon dont l'expert raisonne et celle qu'il devrait adopter pour assurer le mieux possible la validité de ses inférences et de ses conclusions. Nous présentons dans cette communication une méthodologie nouvelle « leCAD » comprenant les étapes suivantes : Élicitation individuelle, Calibration, Agrégation, Débiaisage. L'élicitation propose un formulaire pour le recueil des évaluations expertes incertaines, associant probabilités et intervalles d'incertitudes. La calibration repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique évaluant quantitativement l'éventuelle présence de biais à travers les tendances à la justesse et à la précision des évaluations expertes. La phase d'agrégation permet de combiner les évaluations expertes, tandis que l'étape de réduction des biais permet de proposer des corrections mathématiques des éventuels biais identifiés. Nous présentons une application de l'ensemble de la démarche à des cas de digues. Les probabilités de rupture

calculables pour le mécanisme de glissement sont utilisées pour la calibration des évaluations probabilistes expertes.

Mots-clés

analyse mécano-fiabiliste, biais, jugement expert, calibration

Abstract

The regulations relating to the safety of flood protection levees require the performance of periodic diagnostics and hazard studies integrating the probabilistic assessment of the safety levels of the structures. This type of quantitative approach poses considerable scientific and technical problems for large levees. First, there is often a lack of knowledge about the physical conditions that trigger failure mechanisms. Although the slip mechanism benefits from a sufficiently precise definition and characterization of the limit state to allow the calculation of a probability of failure by quantitative approaches, this is more complex for the mechanisms of overflow, internal erosion and scour: state of the art being developed and stabilized, lack of statistical data, etc. In addition, the variability of the natures and properties of the constituent materials of the structures also pose problems of uncertainty. Also, expert judgment plays an important role in assessing the reliability of levees. Several experts and several fields can be mobilized: geotechnics, civil engineering, river hydraulics, morphodynamics, etc. It therefore appears necessary to provide engineers with approaches and tools allowing them to explain their reasoning, the elicitation of probabilities in a context of lack of knowledge, and to determine and, if necessary, to limit the manifestation of cognitive biases. Very common in expert evaluations, these biases correspond to distortions between the way the expert reasons and the way they should adopt to ensure the best possible validity of their inferences and conclusions. We present in this communication a new methodology "EiCAD" including the following steps: Individual elicitation, Calibration, Aggregation, Debiasing. Elicitation offers a form for collecting uncertain expert assessments, associating probabilities and intervals of uncertainty. Calibration is based on the use of a mathematical model that quantitatively assesses the possible presence of bias through trends in the accuracy and precision of expert assessments. The aggregation phase makes it possible to combine the expert assessments, while the bias reduction step makes it possible to propose mathematical corrections for any identified biases. Calculable failure probabilities for the sliding mechanism are used for all stages of the process.

Key Words

mechano-reliability analysis, bias, expert judgement, calibration

Fusion de données géophysiques (TRE et MASW)
et géotechniques (granulométrie) pour la caractérisation
de digues en terre

*Combination of geophysical data (ERT and MASW)
and geotechnical data (particle size analysis)
for the characterization of earth levees*

T. Dezert¹, S. Palma-Lopes², J.-R. Courivaud³, Y. Fargier⁴, C. Vergnialt⁵

¹ NTNU, Trondheim, Norvège, theo.dezert@ntnu.no

² UGE-GeoEND, Bouguenais, France, sergio.palma-lobes@univ-eiffel.fr

³ EDF-CIH, Bourget du Lac, France, jean-robert.courivaud@edf.fr

⁴ UGE-RRO, Bron, France, yannick.fargier@univ-eiffel.fr

⁵ EDF-TEGG, Aix-en-Provence, France, christophe.vergnialt@edf.fr

Résumé

La bonne caractérisation des ensembles lithologiques des digues en terre constitue un enjeu majeur dans un contexte de prévention de rupture d'ouvrage. En effet, les conséquences d'un tel événement peuvent s'avérer potentiellement catastrophiques (pertes humaines, graves impacts environnementaux et économiques). Les méthodologies reconnues pour caractériser les digues en terre comprennent classiquement des méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques de natures complémentaires. Ce travail de recherche présente une méthodologie de fusion permettant la combinaison de données issues de ces deux types de sources d'information. Ici, les données utilisées proviennent d'une campagne de reconnaissance menée sur une digue de canal EDF. Les résultats obtenus ont été préalablement publiés et présentés sous forme d'un article de revue internationale à comité de lecture. Cette campagne de terrain regroupe trois types d'informations : résistivités électriques, vitesses d'ondes de cisaillement et analyses granulométriques d'échantillons. La méthodologie de fusion introduite repose sur le cadre théorique des masses de croyance. Tout en tenant compte des spécificités de chaque méthode (répartition spatiale, imprécisions et incertitudes des données), cette approche de fusion permet de quantifier le niveau de conflit entre les sources d'information ainsi que d'associer un indice de confiance aux caractérisations proposées. Les résultats de la fusion obtenus, dans le cadre du cas d'étude présenté, mettent en évidence la capacité de cette méthodologie à discriminer les unités lithologiques (remblais fins ou grossiers avec brèches calcaires, socle marneux ou calcaire) ainsi qu'à localiser les positions d'interfaces entre unités et les niveaux de confiance associés. Ces résultats sont en cohérence avec les connaissances déjà disponibles sur le contexte géologique du site et mettent en évidence l'intérêt de combiner des informations issues de sources de nature différente afin de tirer profit de leur complémentarité. Ces travaux ont montré un potentiel prometteur pour cette méthode, tant sur une digue de canal que sur une levée. Ils seront poursuivis par une étude comparative de différentes méthodes de fusion et par la mise en application sur de nouveaux cas réels d'études.

Mots-clés

ouvrage hydraulique en terre, fusion de données, Tomographie de Résistivité Electrique, Multi-channel Analysis of Surface Waves, analyse granulométrique

Abstract

The accurate characterization of lithological layers in earthen levees is a major challenge in the context of preventing structural failure. Indeed, the consequences of such an event can be potentially catastrophic, leading to loss of life, significant environmental impacts, and economic losses. Established methodologies for characterizing earthen levees typically include complementary geophysical and geotechnical investigation methods. This research presents a fusion methodology that combines data from these two types of information sources. The data used here were collected during geotechnical investigations on an EDF canal dike. The obtained results were previously published in a peer-reviewed international journal. The field campaign encompassed three types of information: electrical resistivities, shear wave velocities, and particle size analyses of samples. The introduced fusion methodology is based on the theoretical framework of belief masses. Considering the specificities of each method (spatial distribution, data uncertainties and imprecisions), this fusion approach allows for the quantification of the level of conflict between information sources and for the assignment of a confidence index to the proposed characterizations. The fusion results obtained, in the context of the presented case study, highlight the ability of this methodology to discriminate lithological units (fine or coarse fill with limestone breccias, marly or limestone bedrock), as well as to locate interfaces between units and associated confidence levels. These findings are consistent with the existing knowledge of the site's geological context and demonstrate the value of combining information from different sources to leverage their complementarity. These works have shown promising potential for this method. They will be pursued through a comparative study of different fusion methods and the implementation on new real case studies.

Key Words

hydraulic earth structure, data fusion, Electrical Resistivity Tomography, multi-channel analysis of surface waves, particle size analysis

**La plateforme de recherche DIGUE 2020 : un laboratoire de recherche
in situ pour la conception de digues maritimes,
l'étude des actions de la mer sur les digues et la durabilité**
*The DIGUE 2020 research platform: an in situ research laboratory for the
design of coastal levees, the study of the actions of the sea on the levees
and durability*

**L. Peyras¹, T. Mallet², S. Nicaise¹, T. Manicacci², C. Chevalier³, S. Palma-
Lopes³, P. Azemard⁴, N. Chaouch¹**

¹ INRAE Centre PACA, Aix Marseille Université, UMR RECOVER, 13100 Aix-en-
Provence, France, laurent.peyras@inrae.fr

² SYMADREM, Arles, France, symadrem@symadrem.fr

³ GERS, Université Gustave Eiffel, 13300 Salon de Provence, France,
christophe.chevalier@univ-eiffel.fr

⁴ Cerema, Direction Méditerranée, Laboratoire d'Aix-en-Provence,
Aix-en-Provence, France, pierre.azemard@cerema.fr

Résumé

Les ouvrages de protection contre la houle et/ou contre les submersions couvrent 17 % des côtes françaises, soit environ 1 200 km. Compte tenu du changement climatique, notamment l'élévation du niveau de la mer, et de la démographie importante, les enjeux sur le littoral sont considérables.

Dans ce contexte, la plateforme de recherche collaborative DIGUE 2020, réalisée par INRAE avec le partenariat du SYMADREM, du CEREMA et de l'Université G. Eiffel, a été conçue afin d'améliorer nos connaissances et permettre une meilleure maîtrise du risque de submersion marine. Cette plateforme DIGUE 2020 est adossée à la digue à la mer du SYMADREM dans le parc régional de la Camargue, à cheval sur les communes d'Arles et des Saintes-Maries-de-la-Mer. Il s'agit d'un laboratoire de recherche in situ sur les digues maritimes qui vise à étudier les principales thématiques suivantes :

- la conception et la réalisation de digue en sol-chaux en milieu maritime,
- la quantification des effets de l'action de la mer sur les digues de protection,
- la quantification de la durabilité du matériau des digues en sol-chaux en milieu maritime.

Durant le projet, trois thèses de doctorats ont accompagné la réalisation de la plateforme sur les thématiques de recherche portées par DIGUE 2020. L'article présente les principaux résultats de ces recherches qui ont porté sur :

- la présentation de la plateforme de recherche construite. Celle-ci est un véritable laboratoire de terrain, structuré en différents plots correspondant à des teneurs en chaux différentes. La présentation porte sur la structuration de la plateforme elle-même et sur la présentation des effets de l'érosion par l'action de la mer sur les différents plots en lien avec leur composition ; la présentation des résultats relatifs à l'action de la mer et les investigations non destructives conduites sur la plateforme. Des défauts contrôlés simulant les problèmes courants de type conduits d'érosion ou terriers ont été introduits artificiellement et des mesures géotechniques innovantes depuis la surface ont été déployées ;

- la présentation des résultats relatifs à la caractérisation de la durabilité du sol-chaux pour un ouvrage maritime. Les questions de la durabilité sont encore peu maîtrisées sur une digue en sol-chaux en site maritime et le projet a permis d'investiguer les effets du temps, de l'enchaînement des cycles saisonniers, des cycles maritimes, de l'action des vagues, et des actions physico-chimiques.

Ce laboratoire in situ a vocation à accueillir d'autres projets de recherche, associant des partenaires académiques et du secteur socio-économique (gestionnaires de digues, industriels, bureaux d'ingénierie).

Mots-clés

DIGUE 2020, digue maritime, sol chaux, plateforme de recherche, durabilité

Abstract

Hydraulic infrastructure designed to mitigate flooding covers 17% of the French coastline, roughly equating to 1,200 kilometers. With the pressing concerns posed by climate change, notably rising sea levels, and significant population density, the stakes along the coast are substantial.

In this context, the collaborative research platform DIGUE 2020, spearheaded by INRAE in partnership with SYMADREM, CEREMA, and the University of G. Eiffel, was developed to enhance the management of the risk of marine submersion. The DIGUE 2020 platform is located adjacent to the SYMADREM seawall within the Camargue Regional Park, near the city of Arles. It serves as an in-situ research laboratory dedicated to coastal levees and focuses on the following key areas:

- Design and construction of a soil-lime breakwater in the marine environment.
- Quantification of the impacts of sea actions on coastal levees.
- Assessment of the longevity of lime-treated soil in a maritime environment for coastal levees.

Throughout the project, three PhD theses were conducted in conjunction with the establishment of the platform, centering on the research themes undertaken by DIGUE 2020. The article presents the main results of this research, which focused on:

- The presentation of the built research platform. This is a genuine field laboratory structured in different parts corresponding to different lime contents. The focus is on the structural aspects of the platform itself and the examination of the effects of erosion due to sea actions on the various plots, segments, or sections in relation to their composition,
- The presentation of results pertaining to sea actions and non-destructive investigations performed on the platform. Controlled flaws that simulate common issues such as erosion pipes or burrows were artificially introduced, and innovative geotechnical measures were implemented from the surface,
- The presentation of the results regarding the durability of lime-treated soil for maritime structures. From a maritime perspective, questions about the durability of lime-soil levees remain insufficiently understood. The DIGUE 2020 project has allowed for an exploration of the effects of time, seasonal cycles, maritime cycles, wave actions, and physico-chemical processes.

This in situ laboratory is intended to host other research projects, involving both academic and socio-economic partners (levee managers, industrialists, engineering offices).

Key Words

DIGUE 2020, costal levees, lime-soil, research platform, durability

Désordres chroniques de berges et digues de protection,
retour d'expérience sur les ouvrages de la Métropole de Bordeaux
en bordure de Garonne et Dordogne

*Chronic damages on streambank beside flood-protection levees,
feedback about structures administered by Bordeaux Métropole along
the Garonne and Dordogne rivers*

Y. Nédélec¹, G. Valdeyron¹, P. Kerlan², J. Eoche², N. Carpentier³, J.-N. Jung³

¹ Cerema Sud-Ouest, Bordeaux, France, yves.nedelec@cerema.fr

² Bordeaux Métropole, Bordeaux, France, p.kerlan@bordeaux-metropole.fr

³ Antea Group, Mérignac, France, nicolas.carpentier@anteagroup.fr

Résumé

Les cours inférieurs de la Garonne et de la Dordogne bordent en grande partie des terres basses, protégées contre les eaux par un linéaire considérable de digues. Le danger d'inondation y découle bien évidemment des crues fluviales mais aussi, dans les secteurs sous influence fluvio-maritime, de la variation du niveau de l'eau sous l'action des marées et de la formation de vagues particulièrement hautes dans un estuaire très vaste. Dans cette situation singulière, la gestion des digues est confrontée à d'inexorables évolutions indépendantes de la sévérité des aléas de dimensionnement, qui s'ajoutent à la nécessité d'assurer la protection hydraulique.

C'est notamment le cas lorsque le voisinage de l'ouvrage connaît des transformations lentes, qui engendrent des désordres chroniques ou dégradent progressivement la stabilité de la construction. Nous présentons dans ce contexte un retour d'expérience sur les démarches engagées par la métropole de Bordeaux, qui doit ainsi concilier les approches classiques du Gemapien pour la gestion de ses systèmes d'endiguement et des contraintes ajoutées aux pratiques usuelles par des mécanismes environnementaux pour certains mal connus.

Les exemples présentés illustrent des situations diverses : des estrans vaseux naturels opposés à des fonds aménagés, des berges tantôt naturelles, tantôt consolidées, qui supportent des digues en terre massives et revêtues ou au contraire des murets en béton plus légers. Le trait commun est l'observation en certains lieux d'une dégradation lente et difficilement maîtrisable des terrains riverains : érosion, déformation, rupture, en dépit de dispositifs préventifs qui subissent eux-mêmes des désordres. Les facteurs qui distinguent ces lieux du reste du linéaire de berges sont en eux-mêmes des sources d'interrogation.

Les dommages observés prennent également des formes diverses mais récurrentes et en nombre significatif : déplacement de soutènements, sol évidé ou largement fissuré en bordure des infrastructures protégées, enrochements désorganisés. Ces dommages sont actuellement à l'étude dans le cadre de projets de réhabilitation du système d'endiguement de la presqu'île d'Ambès ou encore de stabilisation des berges dans Bordeaux. Nous présenterons les suivis et les traitements expérimentaux spécifiques complémentaires réalisés ou envisagés dans les secteurs qui restent sujets à des phénomènes d'érosion ou de fluage difficiles à identifier et à maîtriser.

Mots-clés

berge, estuaire, marée, dynamique géomorphologique, relation ouvrage environnement

Abstract

A significant part of downstream courses of Gironde estuary and Dordogne river (Gironde department, France) flow next to flat lands, which are protected against water intrusion by a significant collection of levees. Apart from their natural exposure to overflow during floods, these areas are endangered as well by high tide events and such storm waves as can be formed in such a vast estuary. The peculiarity of this exposure challenges the management authorities with deep evolutions distinct from design events and adding up to the major concern of hydraulic safety.

Such a singularity is met in particular when slow changes affect the structure surroundings, resulting in chronic disorders or in a progressive alteration of stability heading towards a possible failure. In such a context we present a feedback on the courses of action taken by Bordeaux Métropole to face environmental processes still needing enlightenment while its role is also to conform to legal obligations and to meet state of the art practices.

A few examples are given which illustrate a variety of situations: raw foreshore areas versus submerged structures, natural streambanks versus reinforced ones, supporting massive earthen embankments with cladding versus smaller walls made of concrete. These examples have in common the local development of soil or bank slow changes nearby: erosion, deformation, failure, which are hard to prevent with safety measures, the integrity of which is affected by changes too. The very factors which make these places stand apart from the other streambank sections are intriguing as well.

There is some variety as well in recorded disorders, which are yet recurrent and significantly numerous: moves of supporting structures, holes or large cracks in soils abutting protected infrastructures, damaged rip-rap. These disorders are currently studied together with an improvement project of the protection system around the presqu'île d'Ambès (located at Garonne and Dordogne confluence) as well as bank protection in Bordeaux. We will introduce monitoring procedures and experiments specifically dedicated to these erosion or creeping processes hard to identify and control.

Key Words

streambank, estuary, tide, geomorphological dynamics, structure-environment relationship

Démarche de qualification de l'utilisation de la méthode MASW
sur les digues par mesures en environnement contrôlé
et simulations pour évaluer l'influence
de la géométrie 3D des ouvrages

*Qualification of the MASW technique for the characterization
of dykes by measurements in controlled environment
and simulations to assess the influence of the 3D topography*

D. Vautrin¹, I. Zentner², G. D'Urso², G. Hachet², C. Vergniault³, D. Mercadier⁴

¹ EDF R&D PRISME, Chatou, France, denis.vautrin@edf.fr

² EDF R&D ERMES, Palaiseau, France, irmela.zentner@edf.fr

³ EDF DI TEGG, Aix-en-Provence, France, christophe.vergniault@edf.fr

⁴ Cerema Normandie-Centre, Le Grand-Quevilly, France,
dimitri.mercadier@cerema.fr

Résumé

Les digues de protection contre les inondations peuvent faire l'objet de campagnes de reconnaissance dans le but d'identifier d'éventuelles zones de faiblesse et de prévenir tout risque de défaillance. La méthode Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW), non invasive et à faible coût, offre un complément intéressant aux sondages géotechniques. Elle est notamment utile pour les ouvrages de grand linéaire car elle est employable en mode « grand rendement ».

Cependant, la méthode MASW repose sur une hypothèse de milieu 1D stratifié, c'est-à-dire que la surface du sol ainsi que les interfaces entre les différentes couches de sol sont supposées horizontales. Cela n'est a priori pas compatible avec la topographie 3D de l'ouvrage.

Nous avons réalisé une étude de sensibilité des résultats de MASW à la géométrie 3D d'une digue en nous appuyant à la fois sur des mesures expérimentales et sur des simulations. L'ouvrage considéré est une maquette de digue à l'échelle 1.

Dans un premier temps, nous avons proposé une méthodologie de simulation permettant de reproduire numériquement la propagation d'une onde sismique en 3D pour la configuration de la maquette, et nous avons validé ce modèle par comparaison entre signaux numériques et acquisitions réelles. Dans un second temps, nous avons considéré différentes configurations de simulation dans le but d'évaluer l'influence de la géométrie 3D de l'ouvrage.

D'après les résultats obtenus, la géométrie 3D de la digue entraîne une sous-estimation de la profondeur de l'interface entre la digue et le sol. En revanche, son influence sur l'estimation des caractéristiques des couches est négligeable. Ces résultats sont en accord avec le retour d'expérience terrain d'EDF.

D'autres limites restent à approfondir par de nouvelles simulations, en considérant des ouvrages de plus grandes dimensions et à géométries plus complexes. De plus, l'exploitation de la maquette de digue se poursuivra avec la mise en œuvre de méthodes électriques, et avec des travaux sur les méthodes de fusion de données.

Mots-clés

reconnaissance, MASW, essais sur maquette, simulation 3D, étanche

Abstract

The Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) is a geophysical technique that can be applied to flood protection dikes in order to determine their underground characteristics, locate zones of weakness and thus to anticipate any risk of failure. This noninvasive and low-cost technique is complementary to geotechnical investigations. It is particularly useful for kilometers-long structures since it can be carried out in a “high-performance” way.

However, the MASW technique assumes that the probed medium is 1D and stratified, i.e. that the ground surface as well as the interfaces between the underground layers are horizontal. This is a priori not compatible with the 3D topography of the structure.

We performed a sensitivity study of the MASW results with respect to the 3D geometry of a dyke. It is based both on experimental and simulated data. The structure considered here is a full-scale mock-up of a dyke.

First, we defined a simulation methodology to reproduce the 3D propagation of a seismic wave in the mock-up environment. It was validated by comparison between numerical results and real on-site measurements. Then, different simulation configurations were considered to assess the influence of the 3D geometry of the structure.

Results show that due to the 3D geometry, the depth of the interface between the dyke and the underground is underestimated. On the other hand, the impact on the estimated mechanical characteristics values is negligible. These results are consistent with the feedback of EDF.

Other configurations including larger structure and more complex geometries will be considered in future works. Moreover, the dyke mock-up will be used to assess the relevance of electrical techniques, and to study data-mining techniques applied to the imaging of civil engineering structures.

Key Words

reconnaissance, MASW, mock-up tests, 3D simulation, watertight

**Un pénétromètre à pointe contrôlé en force ou en déplacement
pour une caractérisation étendue des sols**
*A penetrometer with a force or displacement-controlled mode for a
comprehensive soil characterization*

**H. Hosseini-Sadrabadi^{1,2}, S. Volcy¹, B. Chareyre¹,
C. Dano¹, L. Sibille¹, P. Riegel²**

¹ Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble-INP, 3SR, F-38000 Grenoble, France

² Equatech.R&D (Groupe Equaterre) : Bureau d'étude ingénierie géotechnique,
74960 Annecy, France,

h.hosseini@equaterre-geotechnique.fr

Résumé

Cette étude présente une méthode pénétrométrique novatrice utilisant un pénétromètre statique (CPT) équipé d'une pointe mécanique. L'objectif est d'évaluer les propriétés du sol, la sensibilité à la liquéfaction, en donnant la possibilité de réaliser les essais dans des conditions difficiles d'accès. Contrairement aux pénétromètres statiques traditionnels, cette méthode se concentre sur la résistance de pointe et utilise un chargement contrôlé en force ou en déplacement depuis la surface.

Les essais expérimentaux ont été effectués avec un pénétromètre spécialement développé par le Groupe Equaterre, dans une chambre de calibration. Le massif de sable fin était soumis à une contrainte de confinement contrôlée. De plus, un modèle numérique basé sur la méthode des éléments discrets a été utilisé pour analyser les résultats.

Les avantages de cette méthode pénétrométrique incluent la possibilité d'évaluer la résistance de pointe, la rigidité du sol, et la détection in-situ de la sensibilité à la liquéfaction, évitant ainsi les difficultés liées à l'échantillonnage dans les zones de faible cohésion et de faible compacité. En résumé, cette étude explore les possibilités offertes par cette méthode pénétrométrique innovante, tant sur le plan expérimental que numérique, en fournissant des informations précieuses sur les propriétés du sol et la susceptibilité à la liquéfaction.

Mots-clés

pénétromètre statique (CPT), module de rigidité, liquéfaction, chambre de calibration,
modèle numérique discret

Abstract

This study presents an innovative penetration test method using a static Cone Penetration Test (CPT) with a mechanical tip. The objective is to evaluate soil properties and susceptibility to liquefaction and perform tests in challenging access conditions. Unlike traditional static penetrometers, this method focuses on cone tip resistance and is based on controlled loading in terms of force or displacement from the surface.

The experimental tests were conducted using a penetrometer developed by the Equaterre Group within a calibration chamber. The fine sand used in the tests was subjected to controlled confinement stress. Additionally, a numerical model based on the discrete element method was implemented to analyze the results.

This method offers several advantages over traditional static penetrometers. It enables the evaluation of cone tip resistance, soil stiffness, and in-situ assessment of liquefaction susceptibility, overcoming difficulties associated with sampling in low-cohesion and low-density zones. In summary, this study explores the possibilities offered by this innovative penetrometer test, both experimentally and numerically, providing valuable insights into soil properties and their response to liquefaction.

Key Words

Cone Penetration Test (CPT), stiffness modulus, liquefaction, calibration chamber, discrete numerical model (DEM)

SEABIM®, le jumeau numérique appliqué à la gestion patrimoniale
de digues maritimes à talus
SEABIM®, a digital twin applied for rubble-mound coastal breakwater
asset management

S. Le Bars¹, T. Launay¹

¹ ID OCEAN, Monistrol-Sur-Loire, France, contact@idocean.re

Résumé

Les digues à talus de protection contre les inondations maritimes sont des ouvrages qui ont une importance stratégique pour l'activité littorale et sont soumis à des sollicitations de houle conséquentes. Dans ce contexte, il est nécessaire d'assurer que la construction de la carapace externe soit la plus fiable possible selon les règles de pose des concepteurs. De plus, des auscultations régulières sont nécessaires sur toute la durée de vie de la digue. Ces inspections permettent d'anticiper les actions de maintenance préventive afin d'éviter toute rupture partielle qui pourrait avoir des conséquences majeures.

SEABIM® est un processus numérique breveté qui génère un modèle 3D fiable et complet d'une carapace préfabriquée. L'algorithme retrouve dans un nuage de points haute résolution (bathymétrie, Lidar, photogrammétrie) la position et l'orientation des blocs de béton qui protègent le talus. Le modèle 3D obtenu permet de vérifier l'imbrication des éléments, d'identifier les blocs cassés par comparaison entre le nuage de points et le jumeau numérique et d'appliquer des filtres automatisés de contrôle de placement. Grâce à la superposition de modèles 3D réalisés à des dates successives, le mouvement de chaque bloc est vectorisé. Cet outil a été appliqué sur de nombreux projets en France et à l'export depuis 2019 tant en suivi de construction neuve qu'en phase de gestion patrimoniale (Nouvelle Route du Littoral, Calais Port 2015, Grand Port Maritime de La Réunion). En complément du processus de modélisation, un cas d'étude sur la digue de La Nouvelle Route du Littoral est présenté.

De plus, SEABIM® intègre un module de segmentation de nuage de points pour les carapaces en enrochements naturels. Ainsi, chaque enrochement est isolé afin de calculer ses caractéristiques géométriques (diamètre nominal, forme, densité de pose) selon les recommandations du guide des enrochements et de suivre son déplacement temporel.

Enfin, l'outil permet aussi la modélisation de carapaces de digue en laboratoire lors des essais de dimensionnement afin de mesurer précisément le mouvement des blocs entre chaque série de vague. Des essais ont déjà été réalisés par plusieurs laboratoires spécialisés.

Mots-clés

jumeau numérique, nuage de points, digue maritime, gestion patrimoniale, carapace

Abstract

Breakwaters are strategically important structures for coastal activities and are subject to considerable wave loads. In this context, it is necessary to ensure that the construction of the outer armor is as reliable as possible, in accordance with the designers' placement rules. In addition, regular inspections are necessary throughout the life of the breakwater. These inspections enable to anticipate preventive maintenance actions in order to avoid any partial failure that could have major consequences.

SEABIM® is a patented digital process that generates a reliable and complete 3D model of breakwater precast concrete armor units. The algorithm uses a high-resolution point cloud (bathymetry, LiDAR, photogrammetry) to determine the position and orientation of the concrete blocks protecting the rubble-mound breakwater. The resulting 3D model can be used to check the interlocking of elements, identify broken blocks by comparing the point cloud with the digital twin, and apply automated placement control filters. By superimposing 3D models produced at successive dates, the movement of each block is vectorized.

This tool has been applied to numerous projects in France and abroad since 2019, both in the monitoring of new construction and in the asset management phase (Nouvelle Route du Littoral, Calais Port 2015, Grand Port Maritime de La Réunion, etc.). In addition to the modeling process, a case study for the Nouvelle Route du Littoral project is presented.

SEABIM® also incorporates a point cloud segmentation module for natural riprap shells. In this way, each riprap is isolated in order to calculate its geometric characteristics (nominal diameter, shape, laying density) in accordance with the recommendations of the rock manual, and to monitor its movement over time.

Finally, the tool can also be used to monitor armor layers during laboratory physical models in wave flumes, to precisely measure the movement of the blocks between each series of waves. Tests have already been carried out by several specialized laboratories.

Key Words

digital twin, point cloud, coastal breakwater, asset management, armor layer

**Polarisation provoquée - une méthode non-intrusive pour caractériser
les écoulements dans les digues :
Application à la rivière de l'Agly**
*Induced polarization as a potential method to estimate ground water
flowpath during floods in Agly river dike*

**A. Ghorbani¹, A. Revil², P. Vaudelet¹, S. Barde-Cabusson¹,
L. Girolami³, S. Bonelli³**

¹NAGA Geophysics, 73370 Le Bourget du Lac, France,

pierre.vaudelet@naga-geophysics.com

²Université Savoie Mont-Blanc EDYTEM CNRS, Le Bourget du Lac, France,

andre.revil@univ-smb.fr

³INRAE, Aix-en-Provence, France, stephane.bonelli@inrae.fr

Résumé

Nous proposons une approche quantitative à partir de mesure de géophysique permettant de caractériser les circulations d'eau dans l'ensemble du volume de la digue. Pour cela nous utilisons la méthode de polarisation provoquée en complément à la tomographie de résistivité électrique. Cette méthode permet de caractériser la capacité des milieux poreux à stocker de manière réversible des charges électriques dans un champ électrique appliqué. Les tomographies de résistivité électrique et de chargeabilité normalisée peuvent être aussi utilisées ensemble pour obtenir une image des teneurs en eau et en argile du sous-sol. Une estimation de la conductivité hydraulique peut être obtenue. En appliquant les conditions aux limites en termes de charge hydraulique (par exemple pendant inondation), il est possible d'utiliser la polarisation provoquée pour modéliser de manière non intrusive l'écoulement de l'eau souterraine dans une digue. Nous pouvons ainsi estimer la distribution de la vitesse de Darcy pour une charge hydraulique donnée et les zones d'érosion actives. Nous illustrons cette approche avec une application sur une digue de l'Agly. L'imagerie géophysique montre qu'elle est en partie construite sur un paléochenal constitué de sable permettant des résurgences sous la digue lors des crues de la rivière. Lorsque la rivière est en crue, la charge hydraulique entraîne l'écoulement des eaux souterraines en aval de la digue, ce qui crée des phénomènes d'ébullition des sables. Les simulations numériques montrent que les zones décharges sont notamment au pied de la digue même avec une perméabilité de sable dans le paléochenal homogène. Ces débits concentrés sont contrôlés par le niveau d'eau de la rivière, la géométrie de la digue et la forme de l'interface argilo-sableuse du paléochenal.

Mots-clés

polarisation provoquée, ERT, écoulement d'eau, vitesse Darcy, propriété hydraulique, Agly

Abstract

In this work, a quantitative approach based on geophysical measurements is proposed to characterize water circulation throughout the volume of the dike. Induced polarization is an extension of electrical resistivity tomography and in addition to electrical conductivity, it

characterizes the ability of porous media to store reversibly electrical charges in an applied electrical field. Electrical conductivity and normalized chargeability tomography can be used in concert to image the water content and clay contents of the subsurface. A permeability estimation can be used with these results to image the hydraulic conductivity of subsurface. Using estimated permeability from petrophysical model and hydraulic boundary conditions (e.g. during flooding) to a numerical Darcy mode can estimate groundwater flow path in dike and its surround areas. This approach demonstrates that the Agly dike is partly built on a paleochannel filled with sand providing resurgences under the dike during river floods. When the river is in flood, the height of the water causes the flow of groundwater downstream of the dike and is responsible for sand boiling phenomena. Numerical simulations show that the discharge zones are notably at the foot of the dike even when the permeability of the sand filling the paleochannel is homogeneous. These concentrated flows are controlled by the water level of the river, the geometry of the dike and the shape of the clay-sand interface of the paleochannel.

Key Words

induced polarization, ERT, SP, underground water flow, hydraulic property, Richard equation, Darcy's velocity

**Évaluation de la performance de digues comportant des infrastructures :
méthode basée sur la formalisation des connaissances**
*Performance evaluation of levees with included networks: a knowledge
formalization based method*

P. Di Maiolo¹, C. Curt¹, L. Peyras¹, R. Tourment¹, B. Beullac¹

¹ INRAE, 3275 route de Cézanne CS 40061 13182 Aix en Provence, France,
pascal.dimaiolo@inrae.fr

Résumé

La défaillance d'un ouvrage hydraulique est susceptible d'avoir des conséquences lourdes en termes de vies humaines, de pertes économiques et de dommages environnementaux. Ces défaillances peuvent être initiées par la présence d'infrastructures de gaz, d'eau, d'électricité ou de communication...qui peuvent générer elles-mêmes ou par effet induit des dégradations et donc une possible atteinte à l'intégrité et à la durabilité des digues dans lesquelles elles sont présentes.

Notre travail vise à développer une méthode d'évaluation de la performance des digues prenant en compte l'influence de la présence d'infrastructures (traversantes ou longitudinales) dans la digue ou à sa proximité. Cette approche « de premier niveau » est facile à utiliser et ne repose pas nécessairement sur des ensembles de données précis et complets. Elle est conçue pour répondre aux besoins de réalisation d'expertises rapides avec des moyens limités (humains ou économiques). L'objectif est de recenser tous les facteurs pertinents de vulnérabilité pour ce qui concerne la performance de la digue dus à la présence d'infrastructures : par exemple en cas de fuites d'eau d'une canalisation vers le corps de digue ou inversement d'une fissure dans une conduite créant un départ de matériau de la digue vers cette conduite.

Cette analyse des interactions infrastructures-digues a débouché sur l'identification et la formalisation de dix indicateurs d'état spécifiques qui assurent une évaluation robuste (répétable et reproductible). Les indicateurs sont recensés et formalisés, ce qui permet de caractériser l'effet de telles infrastructures sur la performance des digues. Enfin, ils ont été agrégés de manière à évaluer la performance de la digue vis-à-vis de l'érosion interne en présence d'infrastructures.

L'érosion interne, définie comme l'entraînement progressif des particules au sein de l'ouvrage, sous l'action de l'écoulement qui le traverse, est à l'origine de très nombreuses ruptures de digues engendrées ces dernières années par des crues. Elle fut entre autres responsable des 16 départs de brèches des digues de Camargue durant les crues du Rhône d'octobre 1993 et janvier 1994, ainsi que des brèches de la crue du Gard de septembre 2002.

Cette méthode a été testée avec succès sur plusieurs configurations de digues présentant des réseaux traversants, dans une approche de validation par jugement expert.

Mots-clés

digue, défaillance, évaluation, aide à la décision, infrastructures

Abstract

The failure of a hydraulic structure is likely to have serious consequences in terms of human lives, economic losses and environmental damages. These failures can be initiated by the presence of gas, water, electricity or communication infrastructures, which can generate damage by themselves or by induced effect and therefore a possible attack on the integrity and durability of the levees in which they are present.

Our work aims to develop a method for evaluating the performance of levees taking into account the influence of the presence of infrastructure (crossing or longitudinal) in the levee or near it. This “first tier” approach is easy to use and does not necessarily rely on accurate and complete datasets. It is designed to meet the needs of carrying out rapid expertise with limited resources (human or economic). The objective is to identify all the relevant vulnerability factors with regard to the performance of the levee due to the presence of: for example in the event of water leaks from a pipe towards the levee body or conversely a crack in a pipe creating a departure of material from the levee towards this pipe.

This analysis of infrastructure-levee interactions led to the identification and formalization of ten specific status indicators that ensure a robust assessment (repeatable and reproducible). The indicators are listed and formalized, which makes it possible to characterize the effect of such infrastructures on the performance of the levees. Finally, they were aggregated in order to assess the performance of the levee with respect to internal erosion in the presence of infrastructure.

Internal erosion, defined as the gradual entrainment of the particles constituting a structure under the action of seepage, is the cause of many levee failures in recent years during floods. Among other things, it was responsible for the 16 breaches in the Camargue levees during the Rhône floods of October 1993 and January 1994, as well as the breaches during the Gard flood in September 2002.

This method has been successfully tested on several configurations of levees with crossing networks, in an expert judgment validation approach.

Key Words

levee, failure, evaluation, decision support, infrastructure

Gestion des risques de réalisation de la passerelle Rapas à Toulouse sur la digue de protection des crues de la Garonne

Management of the risk of construction of the Rapas footbridge on the dyke of protection against Garonne floods

A. Ben Yusef¹, H. Elasmr¹, S. Kerfontain¹, J.-C. Machin²

¹ Geos Ingénieurs Conseils, Rueil-Malmaison, France, geos.contact@geos.fr

² Geos Ingénieurs Conseils SA, Cointrin, Suisse, geos@geos.ch

Résumé

Dans le cadre du projet d'aménagement de l'île du Ramier annoncé par Toulouse Métropole, Geos Ingénieurs Conseils a participé, au sein d'un groupement de Conception-Réalisation, aux études de conception de la passerelle Rapas. Il s'agit d'un pont à haubans de 165 m de long, destiné aux piétons et aux cyclistes afin de leur faciliter l'accès à l'île depuis le quartier historique du Fer à Cheval de Toulouse. Au niveau de ce dernier, la passerelle s'appuie, par le biais d'une culée, sur une digue de protection contre les inondations. Cette digue, construite à la fin des années 1960, avait déjà fait l'objet de travaux de confortement qui ont consisté en la réalisation d'un nouveau parement en béton armé ancré par des clous passifs, et la mise en œuvre d'un système de drainage.

La réalisation de la culée de la passerelle a nécessité un sciage du parement béton puis un terrassement sur 2 m de hauteur. Les fondations de la culée ne devaient pas intercepter les renforcements métalliques de la digue, dont l'implantation a été préalablement déterminée. Alors que l'utilisation de joints étanches permettra d'assurer la continuité de l'étanchéité et de protéger le corps de la digue des infiltrations d'eau après la construction de la culée, la stabilité de la digue pourra être remise en cause en cours de travaux, en cas de crue importante. De plus, les charges importantes appliquées par la culée de la passerelle en crête de la digue pourront provoquer une instabilité en phase travaux ainsi qu'en phase d'exploitation. Le risque de choc d'embâcle sur le tablier au droit de la digue de la passerelle était de même un point sensible à traiter.

Les études menées par Geos ont permis d'écartier tout risque d'impact sur la digue. Les différents risques d'érosion hydrauliques ont été évalués et écartés. Des micropieux assureront le report des charges de la culée au sol d'assise de la digue. L'injection du coulis de scellement a été effectuée à faible pression dans le corps de la digue pour éviter toute instabilité. Des vérifications de la stabilité de la digue en phases provisoire et d'exploitation ont été menées. Enfin, le risque de choc d'embâcle a été écarté en calant l'intrados du tablier de la passerelle à 50 cm plus haut que le Niveau des Plus Hautes Eaux.

Mots-clés

passerelle, érosion, stabilité, Garonne, micropieux, digue

Abstract

As part of the project for the development of Île du Ramier announced by Toulouse Métropole, Geos Ingénieurs Conseils have participated in the conception studies of the Rapas footbridge as part of a Design-Build contract. It is a 165 meters long cable-stayed structure, destined for pedestrians and cyclists in order to facilitate their access to the island from the historical district of Fer à Cheval in Toulouse. In this district, the footbridge's abutment lays on a dyke that protects the city against floods. This dyke, constructed at the end of the 1960s, had already been subject to repair works consisting of the creation of a new reinforced concrete facing that is anchored with passive nails, as well as the implementation of a drainage system.

The creation of the footbridge's abutment needed sawing of the concrete facing then excavating for about 2 m in height. The abutment's foundations needed to avoid the dyke's existing nails, the positions of which were determined beforehand. While the use of waterproof joints will ensure watertightness and protection of the inside of the dyke from water infiltration after the construction of the abutment, the stability of the dyke may be put to the test during construction in case of high flood. Moreover, the loads from the footbridge's abutment on top of the dyke may provoke instabilities during construction works as well as during service. The risk of impact related to log jam on the footbridge deck was also a sensible point that needed treating.

The analyses and the subsequent solutions proposed by Geos have allowed to mitigate all risks of impact on the dyke. The different risks of hydraulic erosion have been evaluated. Micropiles ensure the transfer of the abutment's loads to the founding layer of the dyke thus preventing transfer of loads to the dyke. The injection of the sealing grout was done at low pressure inside the dyke to avoid instabilities. Dyke stability verifications during works as well as during normal functioning have been done. Finally, the risk of impact related to log jam on the footbridge deck shall be mitigated by raising the level of the footbridge deck at 50 cm over the highest water level ever recorded.

Key Words

footbridge, erosion, stability, Garonne, micropiles, dyke

Évaluation des performances d'un limon traité chaux-liants sous sollicitations mécaniques cycliques pour une digue de canal
Performance of lime-cement treated silt under mechanical and cyclic effects for a channelized dike use

**O. Queste¹, V. Berche¹, C. Bizien², L. Donnadiou³, S. Fanelli³,
Y. Boussafir³, F. Szymkiewicz³, P. Reiffsteck³, N. Dufour⁴**

¹ Société du Canal Seine Nord Europe, Compiègne, France, olivier.queste@scsne.fr

² VNF, Paris, France, charles.bizien@vnf.fr

³ Université Gustave Eiffel / GERS / SRO, Marne-la-Vallée, France,
yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr

⁴ Cerema Méditerranée / Équipe de recherche GéoCoD, Aix-en-Provence, France,
nathalie.dufour@cerema.fr

Résumé

Les travaux de recherche de ces dernières années se sont orientés, sous l'impulsion des enjeux liés à la réalisation du Canal Seine Nord Europe, vers l'étude de la durabilité de solutions de traitements de sols permettant de remplir des fonctions spécifiques aux ouvrages hydrauliques. Cependant, l'usage des sols traités en ouvrages hydrauliques, que ce soit dans les parties techniques d'ouvrages d'art ou pour les sections longitudinales des digues interpelle la communauté des experts et des gestionnaires d'ouvrages hydrauliques, avec de multiples interrogations liées aux questions de durabilité, de mise en œuvre, de comportement différentiel, etc. Bien que la technique soit plutôt bien maîtrisée dans le domaine routier ou ferroviaire, le traitement des sols pour une stabilisation de ses propriétés intrinsèques, nécessite de revisiter le référentiel utilisé afin de répondre aux questions légitimes des gestionnaires et des experts du domaine des ouvrages hydrauliques. C'est ainsi que le réemploi des limons rencontrés sur la trace du Canal Seine Nord Europe a été étudié pour quantifier l'évolution de performances de type raideur sur le long terme. Pour répondre pleinement à la question de la durabilité, de nombreuses études sont évidemment à mener et cet article ne présente que l'aspect du comportement sous sollicitations mécaniques cycliques des limons du canal Seine Nord Europe traités à la chaux et au liant hydraulique.

La solution de traitement mixte a été préalablement formulée selon les règles appliquées en techniques routières, permettant de définir un dosage optimum. Puis des essais mécaniques spécifiques sur ces sols traités ont été programmés pour essayer d'appréhender les caractéristiques optimales de ces matériaux traités en fonction de l'usage que l'on souhaite en faire. Un des enjeux pour valider le réemploi des limons traités portait notamment sur l'analyse des processus de détérioration par l'usage de ces matériaux sollicités par des cycles mécaniques rapides pouvant simuler une montée et une descente de niveau d'eau telle qu'elle pourrait se produire dans un sas d'écluse. Un programme d'essais de laboratoire a ainsi été développé par le groupement de maître d'œuvre et le maître d'ouvrage du projet pour évaluer l'effet de ces sollicitations cycliques sur les performances du matériau traité telles que module, résistance en compression, cohésion, angle de frottement. Les enseignements de ce travail permettant d'évaluer la durabilité du traitement dans le temps.

Mots-clés

limon, traitement de sols, durabilité, essais mécaniques cyclique, chaux, liant hydraulique

Abstract

Over the last few years, research work has focused on studying the durability of soil treatment solutions that fulfil the specific functions of hydraulic engineering structures, driven by the challenges posed by the construction of the Seine Nord Europe Channel. However, the use of treated soils in hydraulic engineering structures, as parts of levees or engineering structures, is a matter of concern to the community of experts and stakeholders, with many questions linked to issues of durability, implementation, differential behavior, and so on. Although the technique is fairly well mastered in the road and rail sectors, the soils treatment to stabilize intrinsic properties of sensitive soils requires a review of the standards used in order to answer the legitimate questions of managers and experts in the field of hydraulic engineering. As an example, the re-use of the site of Canal Seine Nord Europe silts was studied in order to quantify changes in stiffness-type performance over the long term. To fully answer the question of durability, numerous studies obviously need to be carried out, and this article presents only the aspect of the behavior under cyclic mechanical stress of silts from the Seine Nord Europe canal treated with 1% lime and 5% of hydraulic binder.

The treatment solution was first formulated in accordance with the rules applied to road techniques, making it possible to define an optimum dosage. Specific mechanical tests on these treated soils were then programmed to try and determine the optimum characteristics of these treated materials according to their intended use. One of the challenges in validating the re-use of treated silts was to analyze the deterioration processes caused by the use of these materials, subjected to rapid mechanical cycles that could simulate the rise and fall of water levels as might occur in a lock chamber. A programme of laboratory tests was therefore developed by the project manager consortium and SCSNE, the project owner to assess the effect of these cyclic stresses on the performance of the treated material, such as modulus, compressive strength, cohesion and angle of friction. The results of this work will be used to assess the durability of the treatment over time.

Key Words

silt, soil treatment, durability, cyclic mechanical solicitation, lime, hydraulic binders

Comment s'assurer de la durabilité d'un ouvrage en terre quand on est maître d'ouvrage ?

How can you ensure the durability of an earth structure when you are the project owner?

V. Berche¹, C. Bizien¹, O. Murru¹, G. Potié¹, O. Queste¹

¹ Société du Canal Seine Nord Europe, Compiègne, France,
veronique.berche@scsne.fr, charles.bizien@scsne.fr, olivier.murru@scsne.fr,
gaetan.potie@scsne.fr, olivier.queste@scsne.fr

Résumé

Le canal Seine Nord Europe consiste en la création d'un canal de 107 km de long entre Compiègne et Aubencheul-au-bac au nord de Cambrai. Il constitue le plus grand projet européen de transport fluvial. Infrastructure linéaire, le Canal Seine Nord Europe sera un projet de terrassement sans équivalent, rencontrant sur son linéaire une grande diversité de situations géotechniques.

De fait, sa construction nécessitera la réalisation d'un grand nombre de rétablissements routiers, de 7 écluses, de ponts canaux (dont un qui sera le plus grand au niveau européen), et d'ouvrages en terre (en déblai ou en remblai) assemblés en 14 barrages (dont 4 de classes A) et d'un barrage réservoir de 14 millions de m³ de hauteur maximale de 42 m également de classe A.

Un tel projet demande à mettre en place des moyens permettant de contrôler la robustesse et la durabilité des ouvrages construits, l'objectif à atteindre est de s'assurer de la pérennité des ouvrages sur une période d'au moins 100 ans. Pour les ouvrages de génie civil, l'approche performantielle sur les bétons permet au MOA de s'appuyer sur une méthodologie déjà éprouvée, il n'en est pas de même pour les ouvrages en terre. De nombreuses références existent dans les domaines routier et ferroviaire sur la façon de concevoir une infrastructure linéaire, sur la manière de mettre en œuvre les matériaux, de les terrasser. Les Eurocodes donnent les critères nécessaires à remplir afin d'obtenir une conception stable et fiable mais ne sont pas applicables dans le domaine des barrages en ce sens que leur application ne décharge pas la responsabilité du concepteur sur le fond. De plus, il existe peu de références sur la manière dont évoluent les sols traités et sur la durabilité des actions de traitement.

Les ouvrages en terre à réaliser dans le cadre du Canal Seine Nord Europe sont des ouvrages destinés à être toujours en eau à l'inverse du thème de ce colloque, cependant l'approche d'un maître d'ouvrage, son questionnement vis-à-vis de l'ouvrage à construire ainsi que les problématiques rencontrées sont relativement similaires :

« Quelles caractéristiques géomécaniques des matériaux retenir et pour quelles fonctionnalités, quelles parties d'ouvrages sont sensibles, quels éléments potentiellement impactant devraient être suivis, comment et quels moyens à mettre en œuvre pour s'assurer de l'atteinte des objectifs de durabilité de ces ouvrages en terre ? Cette présentation pourrait servir d'introduction également aux présentations proposées sur le sujet des limons traités en étanchéité (chantier expérimental de Cizancourt) et derrière les bajoyers d'écluses (études en laboratoire par le Cerema et UGE ainsi que la réalisation du démonstrateur de Marquion)

Mots-clés

méthodologie d'études, traitement des sols, durabilité du traitement, performance

Abstract

The Seine Nord Europe canal involves the creation of a 107 km-long canal between Compiègne and Aubencheul-au-bac, north of Cambrai. It is Europe's largest river transport project. As a linear infrastructure, the Seine Nord Europe Canal will be an unparalleled earthworks project, encountering a wide variety of geotechnical situations along its length.

In fact, its construction will require the building of many road re-establishments, 7 locks, canal bridges (including one that will be the largest in Europe), and earthworks (excavated or embanked) assembled into 14 dams (including 4 class A) and a 14 million m³ reservoir dam with a maximum height of 42m, also class A.

A project of this kind requires the implementation of means to control the robustness and durability of the structures built, the objective being to ensure the longevity of the structures over a period of at least 100 years. For civil engineering structures, the performance-based approach for concrete enables the client to rely on a tried and tested methodology, but this is not the case for earth structures. There are many references in the road and rail sectors on how to design linear infrastructure, how to use materials and how to dig them up. The Eurocodes provide the necessary criteria to be met in order to obtain a stable and reliable design, but they are not applicable to dams in the sense that their application does not relieve the designer of its responsibility on the merit. In addition, there are few references on how treated soils evolve and on the durability of treatment actions.

The earthworks to be built as part of the Seine Nord Europe Canal are intended to be permanently under water, in contrast to the theme of this symposium. However, the approach of a project owner, his questions regarding the structure to be built and the problems encountered are relatively similar:

" Which geomechanical characteristics of the materials to choose and for which functionalities, which parts of the structures are sensitive, which potentially impacting elements should be monitored, and how and what means should be implemented to ensure that the durability objectives of these earth structures are achieved? This presentation could also serve as an introduction to the proposed presentations on the subject of waterproofed silts (experimental worksite at Cizancourt) and behind lock walls (laboratory studies by Cerema and UGE, as well as the Marquion demonstrator).

Key Words

study methodology, soil treatment, treatment durability, performance

**Étude de la réalisation de dispositif d'étanchéité complet
par traitement in situ des matériaux :
performances et retour d'expérience**
*Construction of a complete sealing system using in situ treatment
of materials: design of a monitoring system*

**L. Saussaye¹, G. Potié², V. Berche², D. Mercadier³, R. Benot⁴,
A. Mehenni⁵, C. Alléon⁶**

¹ Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France, [lucile.saussaye@cerema.fr](mailto:Lucile.saussaye@cerema.fr)

² Société du Canal Seine-Nord Europe, Compiègne, France, gaetan.potie@scsne.fr

³ Cerema, Rouen, France, dimitri.mercadier@cerema.fr

⁴ Cerema, St-Brieuc, France, raphael.benot@cerema.fr

⁵ Bouygues Travaux Publics, Gyancourt, France,

a.mehenni@bouygues-construction.com

⁶ ISL, Lille, France, alleon.isl.fr

Résumé

Dans le cadre des études de conception du Canal Seine-Nord-Europe, la Société du Canal Seine-Nord Europe (SCSNE) envisage la possibilité de réemployer les sols présents dans la trace du canal, limons et craies, traités avec des argiles et/ou de la chaux vive et/ou des liants hydrauliques, pour constituer un dispositif d'étanchéité complet (DEC), associant une couche d'étanchéité et une couche de protection. Ce type de dispositif pourrait aisément être transposé et appliqué au cas des digues de protection contre les inondations, bien que celles-ci ne soient pas en charge en permanence.

La SCSNE a ainsi confié la réalisation de planches d'essais en limon et en craie traités au groupement d'entreprise Bouygues Travaux Publics, ISL Ingénierie, Razel-Bec, en collaboration avec Ramery Travaux Publics et Unisol, afin de vérifier la faisabilité d'un tel dispositif, à la fois en termes d'exécution, de perméabilité et d'érodabilité, à court et à long termes (durabilité). Ces planches d'essais ont été réalisées en septembre-octobre 2020. Un bassin a également été créé à l'aide de digues de ceinture en sols traités afin de pouvoir mettre en charge hydrauliquement le DEC (hauteur d'eau de 1 m). Les performances du DEC ont été contrôlées tout au long de sa réalisation puis 1 an après son immersion. Les résultats obtenus sur le DEC en limons traités sont présentés dans cet article.

L'Université Gustave Eiffel et le Cerema ont complété la démarche en associant un contrôle non destructif à long terme de l'homogénéité et de l'étanchéité du DEC et des remblais de ceinture du bassin par une instrumentation et l'érodabilité de limons traités à la chaux et au liant hydraulique par des essais d'érosion de type Mobile Jets Erosion Test (MoJET), afin de capitaliser des informations sur le comportement des planches d'essais en sols traités réalisées à long terme et de définir des méthodes adaptées au contrôle des propriétés du DEC. L'instrumentation est constituée de sondes mesurant la température, la teneur en eau volumique et la succion des matériaux ainsi que de lignes électriques mesurant leur résistivité électrique. L'un des objectifs recherchés est de détecter le front de propagation de l'eau dans les couches du DEC. Une station météorologique permet d'évaluer l'évolution des paramètres enregistrés par rapport aux variations des conditions météorologiques. Quelques résultats de ce suivi complémentaire sur le DEC en limons traités sont également présentés dans cet article.

De nouvelles expérimentations sont programmées en 2023 afin de dégrader le DEC et de vérifier si l'instrumentation en place permet de détecter les défauts générés.

Mots-clés

étanchéité, protection, sols traités, bentonite, liant hydraulique

Abstract

As part of the design studies for the Seine-North Europe Canal, the Seine-North Europe Canal Society (SCSNE) is considering the possibility to reuse the soils present in the canal's footprint, silt and chalk, treated with clay and/or quicklime and/or hydraulic binders, to form a complete sealing system, combining a sealing layer and a protection layer. This type of device could easily be transposed and applied to flood protection dikes, although they are not permanently loaded.

SCSNE assigned to the Bouygues Travaux Publics, ISL Ingénierie and Razel-Bec consortium, in collaboration with Ramery Travaux Publics and Unisol, to lead large-scale trial in treated silt and chalk, in order to verify the feasibility of such a system, both in terms of execution, permeability and erodibility, in the short and long terms (durability). These tests were carried out in September-October 2020. A basin was also created using treated soil embankments to apply a hydraulic load to the complete sealing system (1 m water head). The system performance was monitored throughout its construction and 1 year after immersion. The results obtained with treated silts are presented in this article.

The Gustave Eiffel University and Cerema completed the process by combining long-term non-destructive testing of the homogeneity and sealing of the complete sealing system and the basin's surrounding embankments with instrumentation and the erodibility of lime and hydraulic binder treated silts with Mobile Jets Erosion Test (MoJET), in order to capitalize on the long-term behavior of the treated soils and define suitable methods for monitoring system properties. The instrumentation consists of probes measuring temperature, volumetric water content and material suction, as well as electrical lines measuring electrical resistivity. One of the objectives is to detect the water propagation front in the complete sealing system layers. A meteorological station is used to evaluate the evolution of recorded parameters in relation to variations in metrological conditions. Some of the results of this additional monitoring of the treated silts are also presented in this article. New experiments are scheduled for 2023 to degrade the protection layer and check whether the in situ instrumentation is able of detecting the generated failures.

Key Words

sealing, protection, treated soils, bentonite, hydraulic binder

Caractère monolithique des remblais en Limons traités : Optimisation des modes de compactage, de collage des couches et des performances mécaniques

Monolithic character of treated silt embankments: Optimization of compaction modes, bonding of layers and mechanical performances

M. Bufalo¹, V. Berche², R. Mattras³, O. Queste²

¹ Spie batignolles valerian, Sorgues, France, maurice.bufalo@spiebatignolles.fr

² Société du Canal Seine Nord Europe, Compiègne, France, veronique.berche@scsne.fr, olivier.queste@scsnr.fr

³ EGIS, Seyssens, France, remy.matras@egis-group.com

Résumé

Le projet français « Canal Seine Nord Europe (CSNE) » est excédentaire en matériaux et envisage d'utiliser les limons traités à la chaux et aux liants hydrauliques pour construire les remblais contigus des bajoyers minces d'écluses. Un Démonstrateur a été réalisé en 2021 pour étudier la faisabilité et le comportement du système Remblai contigu / bajoyer. Ce chantier expérimental a permis d'étudier différents processus de compactage afin d'en évaluer les effets sur la compacité et sur le caractère monolithique des remblais contigus en sols fin traités. La méthodologie adoptée pour la réalisation et le suivi des remblais en limons traités a été la suivante :

- Planches d'essais équipées de capteurs de contraintes et de déformation ;
- Test de différents types de compacteurs et de vibration ;
- Contrôle de compactage assisté par GPS ;
- Modélisation 3D du remblai ;
- Mesures du comportement mécanique du massif en matériaux traités in situ (capteurs, cross hole, carottages...) et en laboratoire (nouveaux protocoles expérimentaux...).

Le but de cette présentation est de donner un aperçu des premiers résultats obtenus notamment en ce qui concerne :

- L'homogénéisation des matériaux directement lors de l'extraction grâce au guidage GPS ;
- L'optimisation du compactage à la suite de la réalisation de planches d'essais ;
- L'évolution des caractéristiques mécaniques des matériaux mis en œuvre ;
- Le comportement global du massif en sols traités.

Une attention particulière est accordée aux opérations de compactage et notamment à la répartition des contraintes et déformations dans le sol en fonction du type de compacteur et de son usage. Le sens de déplacement des compacteurs joue notamment un rôle significatif sur la qualité du compactage. Des enseignements ont été tirés :

- sur une méthode permettant de limiter le phénomène feuilletage des matériaux compactés ;
- sur l'évolution de la structure du sol au cours du compactage mesuré par des méthodes empruntées à la géologie structurale.

En permettant de vérifier le respect des objectifs de performance mécaniques ainsi que le collage des couches, entre elles, le Démonstrateur confirme la faisabilité, moyennant le respect

de procédures techniques et pratiques, de réaliser des remblais monolithiques en limons traités.

Mots-clés

blocs techniques, limons traités, compactage, performances

Abstract

The French project "Canal Seine Nord Europe (CSNE)" is surplus in materials and plans to use silt treated with lime and hydraulic binder to build the support blocks of thin lock bajoyers. A "Demonstrator" was carried out in 2021 to study the feasibility and behaviour of the contiguous Backfill / Bajoyer system. This experimental project made it possible to study various compaction processes in order to assess their effects on the compactness and monolithic character of the contiguous embankments in treated fine soils.

The methodology adopted for the implementation and monitoring of treated silt backfill was as follows:

- Test section equipped with stress and strain sensors;
- Testing of different types of compactors and vibration;
- GPS-assisted compaction control;
- 3D modeling of the embankment;
- Measurements of the mechanical behavior of the backfill in materials treated in situ (sensors, cross hole, cores...) and in the laboratory (new experimental protocols...).

The purpose of this presentation is to give an overview of the first results obtained, particularly with regard to:

- Homogenization of materials directly during extraction thanks to GPS guidance;
- Optimization of compaction following the realization of test section;
- The evolution of the mechanical characteristics of the materials used;
- The overall behaviour of the backfill in treated soils.

Particular attention is paid to compaction operations and in particular to the distribution of stresses and deformations in the soil according to the type of compactor and its use. In particular, the direction of movement of the compactors plays a significant role in the quality of compaction. Lessons have been learned:

- on a method to oppose the phenomenon of laminating compacted materials.
- on the evolution of soil structure during compaction measured by methods from structural geology on the other hand.

By making it possible to verify compliance with mechanical performance objectives as well as the bonding of the layers between them, the Demonstrator confirms the feasibility, subject to compliance with technical and practical procedures, of producing monolithic embankments in treated silt.

Key Words

technical blocks, treated silt, compaction, performance

**Comportement des limons traités à la chaux et au liant hydraulique
immergés pendant leur cure**
*Behavior of silts treated with lime and hydraulic binder immersed during
their curing*

O. Queste¹, V. Berche¹, N. Dufour², H. Calissano², L. Batilliot², L. Pigeot²

¹ SCNE, Compiègne, France, Olivier.QUESTE@scsne.fr

² Cerema, GéoCoD, Aix-en-Provence, France Egis, Seyssins, France,
nathalie.dufour@cerema.fr

Résumé

Le Canal Seine-Nord-Europe est un projet majeur de liaison fluviale à grand gabarit visant à raccorder le réseau fluvial français au réseau fluvial européen. Il s'inscrit dans le projet européen Seine-Escaut d'interconnexion des bassins de la Seine et de l'Escaut. Le développement durable est l'un des objectifs centraux du projet. Les travaux de terrassement étant excédentaires en matériaux, les enjeux techniques portent sur la valorisation maximale des matériaux extraits en déblais. Ces enjeux sont identiques à ceux pour les constructions en terre ou les digues. En particulier l'effet de l'immersion sur le comportement des matériaux utilisés est crucial. Pour y répondre, 48 éprouvettes de limons traités à la chaux et au liant hydraulique ont été reconstituées en laboratoire et testées mécaniquement. Elles ont été fabriquées par compactage statique. Ce procédé présentait l'avantage d'être répétable et de constituer rapidement des éprouvettes homogènes, de diamètre 5 cm (élanement 2).

Le programme expérimental avait pour objectif de déterminer les propriétés de résistance et de déformabilité d'un limon traité à la chaux et au liant hydraulique, en fonction des conditions de cure et des conditions de drainage. Ainsi, des paramètres de résistance, de cohésion et d'angle de frottement ainsi que des paramètres de déformabilité (module de cisaillement) ont été déterminés pour différents niveaux de déformation. Le programme expérimental comprenait plusieurs essais mécaniques : - des essais triaxiaux UU à des pressions de confinement de 50, 100, 200 et 300 kPa, - des essais triaxiaux CD à des pressions de confinement de 150, 300, 600 et 1200 kPa, - des essais triaxiaux cycliques contrôlés en fréquence et en déplacement à des pressions de confinement de 150, 300 et 500 kPa, - des essais de résonance en torsion à des pressions de confinement de 150, 300 et 500 kPa. Pour chaque type d'essai, quatre conditions de cure ont été testées : - sans immersion : 90 jours à 20 °C et 270 jours à 20 °C, - avec immersion : 28 jours à 20 °C suivis de 62 jours immergés à 20 °C et 28 jours à 20 °C suivis de 242 jours immergés à 20 °C. Les résultats des essais en laboratoire sont présentés, comparés entre eux et discutés.

Mots-clés

limon traité, chaux, liant hydraulique, essais en laboratoire, cure immergée

Abstract

The Seine-Nord-Europe Canal is a major large-gauge river link project designed to connect the French river network to the European river network, and is part of the Canal Seine-Nord Europe project to interconnect the Seine and Escaut basins. Sustainable development is one of the project's key objectives. As there is a surplus of materials in the earthworks, the technical challenges involve maximizing the value of the materials extracted as excavated material. These challenges are identical to those for earthworks and dikes. In particular, the effect of immersion on the behavior of the materials used is crucial. To address these issues, 48 specimens of lime and hydraulic binder-treated silt were reconstituted in the laboratory and mechanically tested. They were manufactured by static compaction. The advantage of this process was that it was repeatable and rapidly produced homogeneous specimens with diameters of 5 cm.

The aim of the experimental program was to determine the strength and deformability properties of a silt treated with lime and hydraulic binder, as a function of curing conditions and draining conditions. Strength, cohesion, angle of friction and deformability parameters (shear modulus) were determined for different levels of deformation. The experimental program included several mechanical tests: - UU triaxial tests at confining pressures of 50, 100, 200 and 300 kPa, - CD triaxial tests at confining pressures of 150, 300, 600 and 1200 kPa, - frequency- and displacement-controlled cyclic triaxial tests at confining pressures of 150, 300 and 500 kPa, - torsional resonance tests at confining pressures of 150, 300 and 500 kPa. For each type of test, four curing conditions were tested: - without immersion: 90 days at 20°C and 270 days at 20°C, - with immersion: 28 days at 20°C followed by 62 days immersed at 20°C and 28 days at 20°C followed by 242 days immersed at 20°C. Laboratory test results are presented, compared and discussed.

Key Words

treated silt, lime, hydraulic binder, laboratory tests, immersed cure

Thème 6

Analyses de risque, Analyses Coûts Bénéfices, Analyses MultiCritères (aide à la décision 2 - systèmes)

Comité scientifique

Animateurs des relectures et de la session orale

Vincent Cormier

WSP

Marc Vuillet

EIVP

Relecteurs

Bruno Beullac

INRAE

Pierre Breul

Université Clermont Auvergne

Analyse multicritère pour la sélection des ouvrages constitutifs des systèmes d'endiguement

Multicriteria analysis for the selection of constituent structures in flood defense systems

J. Lemaire¹, C. Navarro², O. Priolet³

¹ SCE Aménagement & environnement, Nantes, France, jeremie.lemaire@sce.fr

² Espelia, Nantes, France, christine.navarro@espelia.fr

³ Lorient Agglomération, Lorient, France, opriolet@aqglo-lorient.fr

Résumé

Lorient Agglomération, en charge de la compétence GEMAPI, avait établi une liste d'ouvrages à régulariser en système d'endiguement en 2018, remise en cause par les dernières évolutions réglementaires du décret « digues » en 2019. SCE est alors intervenu dans une démarche d'affinage des études de préfiguration des systèmes d'endiguement liés à l'exercice de la compétence GEMAPI. Il a été proposé de raisonner sur des critères juridiques, réglementaires et techniques multiples de sélection des systèmes d'endiguement potentiels.

Pour mémoire, l'autorité GEMAPI est habilitée à définir des zones protégées sur son territoire et les ouvrages concourant à leur protection, autorisés ou régularisés en système d'endiguement et/ou aménagement hydraulique sur justification de performances.

Afin de justifier la prise en charge publique d'ouvrages au titre de la compétence GEMAPI, les premiers critères déployés se sont basés sur le régime juridique et l'affectation de l'ouvrage : « intérêt général ou à intérêt privé ? », « affectation à la protection contre les inondations ou les submersions marines ? », « réponse à la définition réglementaire de la nomenclature 3.2.6.0 ? »...

Les seconds critères déployés sont des conditions discrétionnaires visant à hiérarchiser l'analyse et aider à la décision. Ils tiennent compte de l'engagement ou non de travaux : « responsabilité de l'autorité GEMAPI ? », « coût et financement ? », « temporalité des procédures ? », « démarches de maîtrise foncière ? », « impact sur les règles d'urbanisme et de constructibilité ? ».

La méthode a permis d'établir trois listes d'ouvrage : les ouvrages incontournables pour l'exercice de la compétence PI, les ouvrages exclus et les ouvrages soumis à arbitrage. Certains ouvrages de la préfiguration de 2018 se sont retrouvés exclus de l'exercice de la compétence. À l'inverse, des ouvrages non identifiés se sont révélés incontournables.

Enfin, pour les ouvrages soumis à arbitrage, il a été proposé une analyse de hiérarchisation permettant de juger de l'opportunité d'engager des réflexions et démarches, en concertation avec l'ensemble des acteurs du territoire. La méthode est répliquable sur l'ensemble du territoire et permet à l'autorité GEMAPI d'être autonome dans l'analyse des demandes des communes quant à l'inscription d'un nouvel ouvrage en tant que système d'endiguement.

La communication vise à présenter cette méthode, confrontée à la lecture des services techniques de l'agglomération et des élus du territoire, en insistant sur l'importance du regard croisé entre approches technique et juridique, à expliciter les critères retenus et à en préciser les limites.

Mots-clés

GEMAPI, préfiguration, système d'endiguement, inondation, submersion

Abstract

Lorient Agglomération, responsible for the GEMAPI competence (Management of Aquatic Environments and Prevention of Flood Risks), established a list of flood defense systems to be regularized in 2018. However, this list was challenged by the recent regulatory developments of the "levees" decree in 2019. In response, SCE intervened to refine the prefiguration studies of flood defense systems related to the exercise of the GEMAPI competence.

A multi-criteria approach was proposed to consider various legal, regulatory, and technical criteria for the selection of potential flood defense systems. It should be noted that the GEMAPI authority is empowered to define protected areas within its territory and the structures contributing to their protection, authorized or regularized as flood defense systems and/or hydraulic structures based on performance justifications. Initially, the first criteria deployed were based on legal provisions and the purpose of the structure: "general interest or private interest?" "dedicated to flood protection?" "compliance with the regulatory definition of nomenclature 3.2.6.0?" The second set of criteria deployed were discretionary criteria aimed at prioritizing the analysis and facilitating decision-making. These criteria considered factors such as the responsibility of the GEMAPI authority, cost and financing, procedural timelines, land acquisition processes, and impact on urban planning and constructability regulations.

This method led to the establishment of three lists of structures: essential structures for the exercise of the GEMAPI competence, excluded structures, and structures subject to arbitration. Some structures identified in the 2018 prefiguration were excluded from the exercise of the competence, while previously unidentified structures were deemed essential. For the structures subject to arbitration, a hierarchical analysis was proposed to assess the appropriateness of initiating discussions and processes in consultation with all stakeholders in the territory. This method is replicable throughout the entire territory and enables the GEMAPI authority to independently analyze requests from municipalities regarding the inclusion of a new structure as an flood defense system.

This presentation aims to introduce this method, taking into account the perspectives of the technical services of the agglomeration and local elected officials, emphasizing the importance of a cross-disciplinary approach between technical and legal perspectives, explaining the criteria adopted, and clarifying their limitations.

Key Words

GEMAPI, prefiguration, flood defense system, flooding, submersion

**Analyse des ouvrages de protection sur le bassin du Vistre
et démarches d'aide à la décision pour statuer sur leur devenir
et assurer leur régularisation administrative : 3 cas de figure
à Caissargues, Vauvert et Saint-Laurent-d'Aigouze**

***Analysis of protective structures in the Vistre basin and decision-
support procedures to decide on their future and ensure their
administrative regularization: 3 case studies in Caissargues, Vauvert and
Saint-Laurent-d'Aigouze***

**C. Creusot¹, A. Mazoyer¹, F. Cebron¹, B. Ledoux², J.L. Nuel³, F. Meyjonade³,
L. Bastid⁴, Y. Dumas⁵**

¹ BRLIngénierie, Nîmes, France, camille.creusot@brl.fr

² EPTB Vistre-Vistrenque, Caissargues, France, bruno.ledoux@vistre-vistrenque.fr

³ Nîmes Métropole, Nîmes, France, jean-luc.nuel@nimes-metropole.fr

⁴ CC Petite Camargue, Vauvert, France, ludovic.bastid@cc-petitecamarque.fr

⁵ CC Terre de Camargue, Aigues-Mortes, France, y.dumas@terredecamarque.fr

Résumé

L'Établissement Public Territorial de Bassin (EPTB) Vistre-Vistrenque, par délégation des Communautés de Communes (CC) Terres de Camargue, Communautés de Communes (CC) Petite Camargue et de la Communauté d'Agglomération (CA) de Nîmes Métropole, ont lancé une série d'études visant à analyser les potentiels systèmes d'endiguement du bassin du Vistre, statuer sur leur devenir et les régulariser administrativement.

Pour cela, ils ont mis au point une trame de cahier des charges permettant de procéder à une analyse par étape, apporter des éléments d'aide à la décision, fixer des jalons de validation, et entamer la procédure administrative adéquate. Concrètement, les principales étapes sont des études techniques, une analyse juridique, et une note de synthèse. Selon les résultats des premières étapes, il est réalisé une aide à la rédaction de convention, la rédaction de l'étude de dangers et la rédaction du dossier d'autorisation. Dans le cas d'un déclassement, il est réalisé l'étude hydraulique de sur-aléa pour la neutralisation éventuelle et l'aide à la rédaction des dossiers de cessations d'activité et de déclassement.

Le bureau d'étude BRLIngénierie a été missionné pour réaliser 3 de ces études, à savoir l'étude des ouvrages de Caissargues [2], Vauvert [3] et Saint-Laurent-d'Aigouze [4]. BRLIngénierie a proposé une méthodologie résolument tournée vers l'aide à la décision, en proposant, en sus des études techniques, une analyse de type Coût-Bénéfice, permettant de quantifier la performance des ouvrages de protection dans plusieurs configurations (état actuel des ouvrages, état fiabilisé, effacement). Ces éléments quantitatifs (techniques et financiers) ont permis de dégager une tendance, confirmer ou infirmer les choix pressentis. Ils sont venus enrichir une réflexion multicritère intégrant de nombreux autres aspects (juridique, politique, réglementaire, etc.).

La présente communication vise à présenter les études réalisées sur ces 3 cas de figure aux enjeux, aux questionnements et aux conclusions différents (classement ou déclassement, avec ou sans neutralisation). Elle met l'accent sur les enseignements de ce type d'approche, les

difficultés rencontrées, et les avantages de ce type d'accompagnement complet, notamment les étapes de concertation et de décision, ainsi que les échanges avec les services de contrôle.

Mots-clés

aide à la décision, classement, déclassement, dossier d'autorisation, neutralisation

Abstract

EPTB Vistre-Vistrenque, by delegation of the Communities of Municipalities Terres de Camargue and Petite Camargue, and Nîmes Métropole, have launched a series of studies to analyze the protective structures in the Vistre basin, to decide on their future and to regularize their administrative status.

To this end, they developed a framework of specifications enabling them to conduct a step-by-step analysis, to provide decision-support elements, to set validation steps, and to initiate the appropriate administrative procedure. Concretely, the first three main steps of this framework are technical studies, a legal analysis, and a summary note. According to the results of these first steps, assistance in writing agreements, hazard analysis studies, and authorization files is implemented. In a decommissioning case, a hydraulic study of over-risk is conducted, and assistance in writing cessation files of activity is proposed.

BRL*Ingénierie* was commissioned to carry out three of these studies, for the protective structure of Caissargues, Vauvert and Saint-Laurent-d'Aigouze. BRL*Ingénierie* proposed a methodology strongly oriented towards decision support, by proposing, in addition to technical studies, a Cost-Benefit analysis. This methodology allows to quantify the performance of protective structures in several configurations (current state, reliable state, and removal). These quantitative elements (technical and financial) helped us to identify trends, and confirm or refute the considered choices. In addition, these elements broadened a multi-criteria approach by integrating many other aspects (legal, political, regulatory, etc.).

The purpose of this paper is to present the studies carried out on these 3 cases, with different issues, questions and conclusions (classification or decommissioning, with or without neutralization). It focuses on lessons learned from this type of approach, the difficulties encountered, and the advantages of this type of comprehensive support, in particular the consultation and decision-making steps, as well as exchanges with the control services.

Key Words

decision support, classification, decommissioning, authorization file, neutralization

Les endiguements de l'Ariège, entre torrents et rivière de plaine :
quelle définition de la protection apportée
par les aménagements historiques ?

*Flood defence systems in Ariège catchment, in a mountainous
environment: how to describe the protection provided by existing
structures?*

A. Brune¹, C. Cambefort¹, N. Pepin², V. Koulinski³, F. Zoccarato⁴, G. Nuti⁴

¹ Cerema, Bron, France, anne.brune@cerema.fr

² ISL, Saint-Jean-de-Luz, France, pepin@isl.fr

³ ETRM, Les Chapelles, France, etrm@cegetel.net

⁴ SYMAR Val d'Ariège, Foix, France, fzoccarato.symarvalariege@orange.fr

Résumé

Être gestionnaire de système d'endiguement en 2023 implique de connaître le mode de fonctionnement des ouvrages en place, leurs capacités de résistance et leurs limites face aux phénomènes auxquels ils peuvent être soumis. La difficulté est accrue dans un contexte torrentiel où les phénomènes sont difficilement prévisibles et mesurables. C'est l'exercice auquel a été confronté le Syndicat mixte d'aménagement des rivières du Val d'Ariège, qui voit son périmètre d'action s'agrandir en 2019 avec la mise en œuvre de la compétence GEMAPI, et hérite à cette occasion d'un patrimoine d'ouvrages classés en tant que digues de protection contre les inondations au titre du décret 2007, dont certains sont situés en moyenne montagne.

Les questions qui se posent alors concernent la définition des études à mener pour compléter la connaissance des ouvrages en place, et analyser leur aptitude à former un système d'endiguement au titre du nouveau décret 2015. Il s'agit, dans un temps très court, de définir les données techniques à acquérir et d'optimiser la commande pour pouvoir couvrir plusieurs sites en parallèle.

Cet article présente la stratégie adoptée pour traiter le cas de deux systèmes d'endiguement historiques du bassin de l'Ariège. Deux systèmes d'endiguement avec des situations différentes qui ont nécessité chacun une approche sur mesure pour qualifier la protection apportée. La première étape a consisté à analyser la documentation existante à l'échelle du bassin et à l'échelle de chaque système. Un cahier des charges a été établi pour compléter les données géotechniques et réaliser des diagnostics d'une part, et acquérir des données topographiques d'autre part. L'élaboration des diagnostics approfondis a conduit à mettre à jour l'analyse hydrologique du bassin, et à bâtir les analyses de transport solide au cas par cas. Les méthodologies d'analyse des risques de défaillance, basées sur des approches multi-scénarios pour les ouvrages de protection torrentielle, ont été adaptées pour chaque potentiel système d'endiguement en fonction du contexte et des données disponibles.

Les diagnostics ainsi réalisés ont permis une première approche de définition des niveaux de protection possibles, devant guider le maître d'ouvrage dans les choix ultérieurs de réalisation d'études de dangers ou d'éventuels travaux. Outre l'aspect réglementaire, l'acquisition de

connaissances supplémentaires sur le fonctionnement des sites soumis aux aléas torrentiels permet au gestionnaire d'adapter ses modes d'intervention et de surveillance.

Mots-clés

systèmes d'endiguement, contexte torrentiel, diagnostic, étude de dangers, niveau de protection

Abstract

In France, the organisations in charge of flood defence systems management, need to gather several data about the performance of hydraulic structures. They have to prove that the levee systems remain stable during floods, and they also need to know when the level of normal service is outreached. This is all the more complicated in a mountainous environment, where climatic phenomena are difficult to predict and to relate to river behaviour. This was the task that had to undergo the "SYMAR Val d'Ariege", the local structure in charge of flood prevention in the Ariege catchment, located in the Pyrenees mountains, south of France. In 2019, the SYMAR Val d'Ariege inherited several flood defence systems whose structural performance had to be characterized in order to comply with French regulation on hydraulic structures.

To achieve this, the SYMARVA had to capitalize on historical knowledge about these levee systems, regarding hydraulics as well as geotechnique. Then, it was necessary to complete this knowledge with the help of engineering consultants, especially to produce risk assessment study for the levee systems.

This article details the process by which two historical levee systems were characterized. Although both these levee systems are subject to flash floods as well as debris flows, their geographical situation differ. Each of them required an adapted analysis, based on historical data as well as new topographical, geotechnical and geomorphological data. The analysis of historical documentation helped the SYMARVA to understand the global functioning of the existing structures and their catchments. It allowed to focus on missing data to complete the description of both sites. Hydrology and sediment transport data have been updated. Using these data, two diagnosis have been elaborated, that give information to the manager of levee systems about the structural performances that can be provided by existing structures. Methodologies to characterize failure probabilities have been adapted for each site, taking into account available data and site expertise.

These completed diagnosis give updated information about the level of protection provided by the existing structures, that is difficult to characterize in a mountainous environment. It's a key information for levee systems manager, who can then organize levees monitoring and try to anticipate flood response and crisis situations.

Key Words

levee systems, mountainous environment, hazard study, levee diagnosis, level of protection

Analyse multicritères (AMC) inondation dans le grand delta du Rhône : mise en place d'une méthode probabiliste d'évaluation des enjeux impactés et des dommages

Flood multicriteria analysis (AMC) in the delta of the Rhone river: implementation of a probabilistic approach to evaluate impacted issues and damages

T. Mallet¹, F. Matéo¹

¹ SYMADREM, Arles, France, symadrem@symadrem.fr

Résumé

Suite aux inondations causées par la crue de décembre 2003, l'État a mis en place une stratégie de prévention des inondations à l'échelle du bassin versant : le plan Rhône décliné dans le grand delta du Rhône par le SYMADREM (Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des digues du Delta du Rhône et de la Mer) dans un programme de sécurisation des ouvrages de protection contre les crues du Rhône du barrage de Vallabrègues jusqu'à la Mer. Sur les 450 millions d'euros d'investissements envisagés à l'horizon 2032, 215 millions d'euros ont été investis de 2007 à 2022 de Beaucaire/Tarascon à l'aval du centre-ville d'Arles.

En perspective des travaux à venir sur les digues du Petit Rhône et du Grand Rhône aval dont le montant est estimé à 153 millions d'euros, le SYMADREM a réalisé une AMC inondation sur son périmètre de compétence, qui concerne trois systèmes d'endiguement fluviaux, 20 communes, 102 000 personnes et qui couvre une superficie de 1 500 km².

Sur la base de fonctions de dommages développées par le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), les dommages monétaires ont été calculés pour 220 scénarios d'inondation issus des études de dangers (EDD). Un travail analogue a également été mené pour les enjeux non monétarisés : le nombre de personnes inondées en situation ou non de danger et le nombre d'emplois impactés.

Les bénéfices monétaires et non monétaires, générés par les travaux du programme de sécurisation, ont été appréciés par la comparaison du Dommage Moyen Annuel (DMA), du Nombre Moyen Annuel (NMA) de personnes et d'emplois impactés par les inondations entre l'état initial de 2007, et l'état final correspondant à la sécurisation complète des ouvrages, ainsi qu'entre plusieurs états intermédiaires correspondant à différentes phases clés du programme.

Pour le calcul du DMA, du NMA et du Volume Déversé Moyen Annuel (VDMA), un modèle probabiliste a été développé. Calé sur l'observation des événements passés et alimenté par les données issues des études de dangers, l'outil probabiliste a utilisé l'inférence Bayésienne permettant de passer de la probabilité de brèche de chaque tronçon de digue à la probabilité globale de brèche des systèmes d'endiguement et *in fine* du grand delta. Les résultats produits confirment *a posteriori* la pertinence socio-économique des travaux du plan Rhône.

Mots-clés

coût-bénéfice, enjeu, probabilité, risque

Abstract

Following the floodings caused by the December 2003 flood, French State settled a prevention strategy against the floodings at the watershed scale: the “Plan Rhône”, defined in the Rhône Great Delta by the SYMADREM (Public institution for management of river and sea levees in the Rhône Delta), in a safety program for the protection works against the Rhône floods from the Vallabrègues dam to the sea. For the 450 million euros considered in investment till 2032, 215 million euros were invested between 2007 and 2022 from Beaucaire/Tarascon, to downstream Arles city center.

In anticipation of upcoming works on the Petit Rhône and Grand Rhône downstream levees, the amount of which is estimated at 153 million euros, the SYMADREM carried on a flood multi-criteria analysis on its scope of competence, which concern three levees systems, 20 municipalities, 102 000 people and covers a 1 500 km² area.

Based on damages functions developed by the CGDD, the monetary damages were calculated for 220 flooding scenarios coming from the hazard studies. A similar job was also carried out for the non-monetary issues: the number of people flooded in hazardous situation or not and the number of employments impacted.

The monetary and non-monetary benefits, generated by the safety program works, were valued by the comparison of the Expected Annual Damage (EAD), the Expected Annual Number (EAN) of people and employments impacted by the floodings, from the initial status in 2007, and the final status relevant to the works global safety, and several intermediary stages, corresponding to the different program key stages.

For the EAD, EAN and EASD (Expected Annual Spilled Volume), a probabilistic model was developed. Based on the observation of the past events and supplied by data coming from the hazard studies, the probabilistic tool used the Bayesian inference allowing to go from the breach probability of each levee section, to the global breach probability of the levees system and *in fine* of the Great Delta. The results produced confirm *a posteriori*, the socio-economical pertinence of the “Plan Rhône” works.

Key Words

cost-benefit, issue, probability, risk

Fonctionnement hydraulique du système d'endiguement du val d'Orléans, conception et réalisation des travaux de gestion de la surverse des digues (Loiret)

Hydraulics of the levee system of the "val d'Orléans", design and operation for managing the overtopping of the levees (Loiret)

E. Henry¹, A. Valenziano², A. Kaboré³

¹Antea Group Métier Eau, Antony, France, elsa.henry@anteagroup.fr

²Antea Group, Métier Infrastructures, Olivet, France,
alexandre.valenziano@anteagroup.fr

³Antea Group, Métier Infrastructures, Olivet, France,
auguste.kabore@anteagroup.fr

Résumé

La levée du Val d'Orléans est localisée sur la rive gauche de la Loire dans le département du Loiret et présente les particularités de ne pas être fermé à son extrémité aval et d'avoir un déversoir à Jargeau. Le système d'endiguement (classé A) représente un enjeu considérable avec près de 65 000 habitants et 15 500 salariés. L'étude de dangers (EDD) de la levée du Val d'Orléans (DREAL Centre-Val de Loire, 2012), a montré que le niveau de sureté actuel des digues est bien inférieur au niveau de première surverse.

Son déversoir a été créé en 1882 suite aux trois crues exceptionnelles de la Loire de 1846, 1856 et 1866 à l'emplacement d'une brèche de 1856. Il a été dimensionné par rapport au niveau de la crue de 1825 mais n'assure plus son rôle aujourd'hui car d'autres zones sont susceptibles de surverser avant qu'il n'entre en fonctionnement lors d'une crue exceptionnelle.

Pour y remédier, la DREAL Centre-Val de Loire a confié à Antea Group une mission de maîtrise d'œuvre sur ce système d'endiguement.

Dans un premier temps, les opérations pour optimiser la gestion de la surverse du val d'Orléans ont été définies dans le projet global de fiabilisation des digues, publié en 2015 par le Département des Études et Travaux de la Loire (DETL) de la DREAL Centre - Val de Loire. Ces opérations ont depuis été précisées et consistent à :

- remettre en fonctionnement le déversoir à Jargeau (abaissement du tiers de la hauteur du fusible),
- rendre la digue résistante à la surverse en son point le plus bas à Guilly,
- renforcer les banquettes où cela est nécessaire (Guilly, Sigloy, St-Denis-en-Val).

Ces opérations permettront de maîtriser l'inondation du val d'Orléans pour une grande crue de type XIX^e siècle : en limitant le volume d'eau entrant (via le déversoir réhabilité) réduisant ainsi le risque de rupture de la digue. Le risque de brèche sera largement réduit sur les digues pour ce type de crue. Les hauteurs d'eau dans le val seront considérablement diminuées par rapport à la situation actuelle (les territoires concernant 26 000 personnes ne seront plus inondés et ceux concernant 18 000 personnes seront moins inondés). Les dégâts sur les biens seront minimisés et le retour à la normale sera plus rapide.

Mots-clés

endiguement, Loire, travaux, surverse, déversoir

Abstract

The Val d'Orléans levee is located on the left bank of the Loire in the Loiret département and is unique in that it is not closed at its downstream end and has a spillway at Jargeau. The levee system (classified A) is of considerable importance, affecting some 65,000 inhabitants and 15,500 employees. The French levee risk survey (EDD) of the Val d'Orléans levee (DREAL Centre-Val de Loire, 2012), showed that the current level of shelter of the levees is well below the first overflow level.

Its spillway was created in 1882 following the three exceptional Loire floods of 1846, 1856 and 1866, on the site of a breach in 1856. It was designed to cope with the 1825 flood level, but is no longer fulfilling its role today, as other areas are likely to overflow before it comes into operation during an exceptional flood.

To remedy this situation, the DREAL Centre-Val de Loire has awarded Antea Group a project management contract for this levees system.

Initially, operations to optimize overflow management in the Val d'Orléans were defined in the overall levees reliability project, drafted in 2015 by the DREAL Centre - Val de Loire studies and works office of the Loire. These operations have since been specified and consist of:

- restoring operation of the Jargeau spillway (lowering the fusegate by a third),
- make the dike resistant to overtopping at its highest point.
- reinforce embankments where necessary (Guilly, Sigloy, St-Denis-en-Val).

These operations will make it possible to control flooding in the Val d'Orléans in the event of a major 19th century flood: by limiting the volume of incoming water (via the rehabilitated weir), thereby reducing the risk of dike failure. The risk of levee breach will be greatly reduced for this type of flood. Water levels in the valley will be considerably lower than at present (territories affecting 26,000 people will no longer be flooded, and those affecting 18,000 people will experience less flooding). Damage to property will be minimized and the return to normalcy will be faster.

Key Words

levee, Loire, operation, overflow, spillway

Évaluation probabiliste de la fiabilité des digues prenant en compte les mécanismes de glissement, d'érosion interne et de surverse : application à une étude de cas au Canada

Probabilistic assessment of the reliability of levees taking into account the mechanisms of sliding, internal erosion and overflow: application to a case study in Canada

B. Beullac¹, F. Mainguenaud¹, L. Peyras¹, C. Carvajal¹, U.T. Khan², J. Sharma²

¹ INRAE, RECOVER, Aix Marseille Univ, Aix-en-Provence, France,
bruno.beullac@inrae.fr

² Lassonde School of Engineering, York University, Toronto, Canada,
bruno.beullac@inrae.fr

Résumé

Les digues sont des ouvrages hydrauliques importants qui font partie des systèmes de protection contre les inondations. L'évaluation des causes et des effets de leur défaillance en situation de crues ou en situation de mise en charge est une composante importante de l'analyse du risque d'inondation. Dans ce projet de recherche conduit sous la forme d'une thèse en cotutelle internationale entre INRAE et l'école d'ingénieur Lassonde de l'université de York (Canada), nous étudions, dans un cadre probabiliste, le risque d'inondation dans une zone protégée par un système de protection contre les inondations.

Pour cela, la première étape, décrite dans cet article, consiste à estimer dans un cadre probabiliste la fiabilité des ouvrages vis-à-vis des différents mécanismes de rupture. Nous avons proposé une méthode d'évaluation des probabilités de défaillance des digues intégrant à la fois les mécanismes de glissement, d'érosion interne régressive et d'érosion par surverse, celles-ci étant représentées par des courbes de fragilité. Nous avons testé deux approches pour agréger les courbes de fragilité en une seule courbe de fragilité globale, en utilisant une approche par courbe enveloppe et une approche par simulations de Monte-Carlo. Notre méthode a été éprouvée dans une étude de cas visant à évaluer la fiabilité des digues en remblai de la rivière Bow à Calgary, au Canada, pour plusieurs périodes de retour des crues.

Pour évaluer les probabilités du mécanisme de glissement, nous avons mis en œuvre un calcul à l'équilibre limite et des simulations de Monte-Carlo sur les propriétés de résistance au cisaillement des sols modélisés par des variables aléatoires, permettant d'obtenir un facteur de sécurité pour chaque tronçon de digue et une probabilité de rupture.

L'analyse de l'érosion régressive a été effectuée en comparant les gradients hydrauliques au gradient hydraulique critique du matériau constituant le remblai. Les gradients hydrauliques locaux ont été déterminés à l'aide d'une modélisation hydraulique aux éléments finis. Le gradient hydraulique critique a été modélisé comme une variable aléatoire à partir de la formulation de Terzaghi. Cela a permis d'estimer les probabilités d'initiation du mécanisme d'érosion interne régressive. Nous avons discuté de la manière dont le choix de la zone de gradient hydraulique et la prise en compte d'un modèle en régime permanent ou transitoire impactent les probabilités de rupture par érosion régressive.

L'évaluation des probabilités de rupture pour le mécanisme de surverse nécessitait le jugement expert sur la base de la connaissance de la période de retour de la crue conduisant au début

de la surverse et de la charge hydraulique déversante. Au final, le travail produit permet d'aboutir, au moyen de simulations de Monte-Carlo, à une courbe de fragilité agrégée pour les trois mécanismes.

Mots-clés

analyse de risque, probabilité, digues, courbe de fragilité, mécanismes de rupture

Abstract

Levees are important hydraulic structures that are part of flood protection systems. Assessing the causes and effects of their failure when exposed to flooding is an important component of flood risk analysis. In this research project conducted in the form of a joint international thesis between INRAE and the Lassonde engineering school of the University of York (Canada), we are studying, within a probabilistic framework, the risk of flooding in an area protected by a flood protection system.

For this, the first step, described in this article, consists in estimating in a probabilistic framework the reliability of the structures for the different failure mechanisms. We have proposed a method for evaluating the probabilities of failure of levees integrating both the mechanisms of sliding, regressive internal erosion and erosion by overflow, these being represented by fragility curves. We tested two approaches to aggregate fragility curves into a single global fragility curve, using an envelope curve approach and a Monte-Carlo simulation approach. Our method was tested in a case study to assess the reliability of levees on the Bow River in Calgary, Canada, for multiple flood return periods.

To evaluate the probabilities of the sliding mechanism, we implemented a limit equilibrium calculation and Monte-Carlo simulations on the shear strength properties of soils modeled by random variables, allowing to obtain a factor of security for each section of levee and a probability of failure.

The analysis of the regressive erosion was carried out by comparing the hydraulic gradients to the critical hydraulic gradient of the material constituting the levee. Local hydraulic gradients were determined using finite element hydraulic modelling. The critical hydraulic gradient was modeled as a random variable from Terzaghi's formulation. This made it possible to estimate the probabilities of initiation of the regressive internal erosion mechanism. We discussed how the choice of the hydraulic gradient zone and the consideration of a steady-state or transient model impact the probabilities of failure by regressive erosion.

Assessing failure probabilities for the overflow mechanism required expert judgment based on knowledge of the flood return period leading to the onset of the overflow and of the overflowing hydraulic loading. In the end, the work produced makes it possible to arrive, by means of Monte-Carlo simulations, at an aggregate fragility curve for the three mechanisms.

Key Words

risk analysis, probability, levees, fragility curve, failure mechanisms

Étude sur le devenir du système d'endiguement
de Saint-Pierre-du-Vauvray (27)
*Study on the future of the Saint-Pierre-du-Vauvray
embankment system (27)*

J.-P. Masset¹, R. Trenkmann¹, A. Bontemps²

¹ Cerema, Blois, France, Jean-Paul.Masset@cerema.fr, Remi.Trenkmann@cerema.fr

² Communauté de communes Granville Terre & Mer, Granville, France,
a.bontemps@granville-terre-mer.fr

Résumé

Cette étude, réalisée pour le compte de la Communauté d'Agglomération Seine Eure (CASE), vise à étudier le système d'endiguement (non classé) présent sur la commune de Saint-Pierre-du-Vauvray (département de l'Eure (27), France). Cette digue est un ouvrage ancien en terre d'environ 11 km datant du XIX^e siècle. La digue est située le long de la rive gauche de la Seine entre les communes de Saint-Pierre-du-Vauvray et de Poses. La digue est édifiée sur des terrains dont les propriétaires sont multiples (Syndicat mixte de la base de loisirs de Léry-Poses, Établissement public foncier de Normandie et propriétaires privés). Elle assure la protection de zones urbanisées, industrielles et de loisirs situées en arrière de l'ouvrage de protection contre les crues de la Seine. De précédentes études indiquent que seule la partie amont de l'ouvrage peut encore avoir un rôle de protection contre les inondations. La mission du Cerema a pour objectif de caractériser la topographie, le fonctionnement hydraulique, l'état des ouvrages et de définir la zone potentiellement protégée par ce système, afin d'établir une proposition de classement au titre de la réglementation sur les ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations. Dans une première phase, le Cerema a donc défini un système d'endiguement cohérent, qualifié l'état des divers tronçons, estimé la zone protégée potentielle et les enjeux économiques et humains présents dans cette zone. Enfin, une estimation des coûts de réhabilitation ou de neutralisation du système a été établie. Dans le cadre de la phase 2, une modélisation hydraulique 2D de divers scénarios d'aménagement ou de neutralisation a permis d'identifier l'emprise de la zone inondée, les hauteurs et vitesses maximales, les durées de submersion et l'évaluation des dégâts selon l'occurrence des crues afin d'établir des courbes de dommages et de préciser l'efficacité hydraulique du système d'endiguement. En s'appuyant sur une analyse multicritère et une analyse coûts-bénéfices (AMC/ACB), une synthèse comparative des solutions de neutralisation et de la solution de réhabilitation est alors proposée, constituant un outil d'aide à la décision. Forte de ces indications, la CASE (autorité gémapienne) a décidé de lancer une étude de définition du système d'endiguement à retenir en vue de réaliser son étude de dangers et de définir le niveau de protection sur lequel elle s'engagera.

Mots-clés

GEMAPI, modélisation hydraulique, système d'endiguement, AMC, ACB

Abstract

This study, carried out on behalf of the agglomeration community Seine Eure (CASE), aims to examine the dyke system (not classified) in the commune of Saint-Pierre-du-Vauvray (Eure department (27), France). This dyke is an old earthen structure of approximately 11 km dating from the XIXth century. The dyke is located all along the left bank of the Seine between the communes of Saint-Pierre-du-Vauvray and Poses. The dyke is built on land owned by several parties (Joint Syndicate of the Leisure Centre of Léry-Poses, Normandy public land agency and private owners). It protects urban, industrial and leisure areas located behind the structure against flooding from the Seine. Previous studies indicate that only the upstream part of the structure can still play a role in protecting against flooding. The aim of Cerema's assignment is to characterise the topography, hydraulic operation and condition of the structures and to define the area potentially protected by this system, in order to draw up a classification proposal under the regulations on structures built or developed to prevent flooding.

Finally, an estimate of the cost of rehabilitating or neutralising the system has been drawn up. As part of phase 2, 2D hydraulic modelling of various development or neutralization scenarios is used to identify the extent of the flooded area, maximum heights and velocities, the duration of submergence and an assessment of the damage according to the occurrence of floods, in order to establish damage curves and specify the hydraulic efficiency. Based on a multi-criteria analysis and a cost-benefit analysis (MCA/CBA), a comparative summary of the neutralization solutions and the rehabilitation solution is then proposed as a decision-making tool. On the basis of this information, CASE (the managing authority) has decided to launch a study to define the embankment system to be selected in order to carry out its hazard study and define the level of protection to which it will commit.

Key Words

GEMAPI, hydraulic simulation, dyke system, MCA, CBA

Thème 7

Confortement et travaux sur les ouvrages et systèmes

Comité scientifique

Animateurs des relectures et de la session orale

Sébastien Patouillard

DREAL Centre Val de Loire

Akim Salmi

ISL

Relecteurs

Christophe Delaunay

SCP

Thibaut Mallet

Symadrem

Yann Quefféléan

ONF-RTM

Lucile Saussaye

Cerema, ENDSUM

Mathieu Normand

EGIS

Barrages en Sol Cimenté :
présentation du nouveau Bulletin 195 de la CIGB
Cemented Soil Dams: presentation of the new ICOLD Bulletin 195

D. Puiatti¹, M. Lino², P. Cochet³, S. Bonelli⁴

¹ DPST Consulting, Villemomble, France, daniel.puiatti@dpst-consulting.eu

² ISL, Lyon, France, lino@isl.fr

³ PC Consulting, Claix, France, pierre.a.cochet@orange.fr

⁴ INRAE, Aix-en-Provence, France, stephane.bonelli@inrae.fr

Résumé

Dans le Bulletin 195 Barrages en Sol Cimenté, récemment publié par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), le terme « Sol Cimenté » désigne tout sol lié, que ce soit suite à un traitement à la chaux, au ciment, ou à la chaux en association avec le ciment, le cas échéant avec addition de composants pouzzolaniques. Le bulletin fait aussi mention des liants hydrauliques routiers. En Europe, où ces produits sont normalisés et contrôlés, ils peuvent avantageusement remplacer les ciments. Le traitement des sols est une technique ancienne et éprouvée qui a connu au cours des soixante dernières années un développement spectaculaire, en particulier dans le domaine des infrastructures de transport. Des exemples d'applications existent également dans le domaine des ouvrages hydrauliques, ce qui a conduit la CIGB à publier le Bulletin 54, Sol-ciment pour barrages en remblai (1986), consacré à l'utilisation de matériaux granulaires traités au ciment pour la protection des talus amont des barrages en terre.

Depuis les années 1980, la technique a considérablement évolué grâce aux progrès de la technologie d'une part, et à une utilisation plus rationnelle de la chaux aérienne calcique d'autre part. En outre, d'importants programmes de recherche et des retours d'expériences positifs ont permis de mieux explorer et caractériser les performances des sols traités et d'en tirer un meilleur profit.

Le nouveau Bulletin 195 couvre l'utilisation des sols cimentés dans la réalisation d'ouvrages hydrauliques. S'il s'appuie sur le Bulletin 54 exclusivement consacré au ciment, il le complète avec l'utilisation de la chaux aérienne calcique, permettant ainsi d'élargir le champ d'application de la technique au traitement des sols limono-argileux. S'agissant de la valorisation de matériaux naturels, donc non élaborés, il insiste particulièrement sur l'importance des études préalables : reconnaissance des gisements et études en laboratoire. Profitant de l'expérience acquise dans les infrastructures de transport, il étend largement l'utilisation des sols traités à d'autres applications que les protections de talus amont, notamment aux barrages homogènes de hauteur moyenne (jusqu'à 30 m de haut), aux barrages zonés et aux digues. Il fournit des recommandations utiles pour la conception, la construction et la réparation des barrages et des digues faisant usage de sols cimentés

Mots-clés

barrage, digue, sol cimenté, chaux, ciment

Abstract

In Bulletin 195 Cemented Soil Dams, recently published by the International Commission of Large Dams (ICOLD), the term "Cemented Soil" is used to designate any soil bonded, whether by treatment with lime, cement or lime in combination with cement, with addition of pozzolanic components if appropriate. Bulletin also mentions hydraulic road binders. In Europe, where these products are standardized and controlled, they can advantageously replace cements. Soil treatment is an old and proven technique that has undergone spectacular development over the last sixty years, particularly in the field of transport infrastructure. Examples of applications also exist in the field of hydraulic structures, leading ICOLD to publish Bulletin 54, Soil-cement for embankment dams (1986), on the use of cement-treated granular materials to protect the upstream slope of earth dams.

Since the 1980s, the technique has evolved considerably, thanks to advances in technology on the one hand, and more rational use of calcium air lime on the other. In addition, major research programs and positive feedback have made it possible to better explore and characterize the performance of treated soils, and to derive greater benefit from them.

The new Bulletin 195 covers the use of cemented soils in the construction of hydraulic structures. While it builds on Bulletin 54, which was devoted exclusively to cement, it complements it with the use of calcium air lime, thus extending the scope of the technique to the treatment of silty-clay soils. With regard to the use of natural materials, *i.e.* unprocessed, it places particular emphasis on the importance of preliminary studies: investigations of deposits and laboratory studies. Drawing on experience gained in the field of transport infrastructure, it broadly extends the use of treated soils to applications other than upstream slope protection, notably to homogeneous medium-height dams (up to 30 m high), zoned dams and levees. It provides useful recommendations for the design, construction and repair of dams and levees using cemented soils.

Key Words

dam, levee, cemented soil, lime, cement

Conception structurelle des digues de protection contre les inondations de la Motupe et de La Leche (Lambayeque, Pérou)

Structural design of the Motupe and La Leche flood protection levees (Lambayeque, Peru)

M. Vesin¹, S. Wyttbach¹, N. Lutzwiller¹, F. Kuate¹, C. Galvain¹

¹ Ingérop, Strasbourg, France, maxime.vesin@ingerop.com

Résumé

La côte Pacifique Sud-Américaine est exposée au phénomène El Niño, qui engendre régulièrement des crues importantes. Les dernières crues majeures datent de 2017. À la suite de ces événements, des programmes importants de création de système de protection contre les inondations sont portés par l'État Péruvien.

Depuis 2021, nous participons à l'un de ces programmes, étant en charge des conceptions préliminaires, détaillées et d'exécution de systèmes d'endiguement sur deux bassins versants nécessitant la création de 90 km d'ouvrages de protection contre les inondations. Notre objectif est d'aboutir à des ouvrages fiables, viables économiquement et ayant un impact environnemental et social aussi réduit que possible.

Cet article constitue un retour d'expérience sur les défis techniques rencontrés lors de la conception structurelle des ouvrages. Il résume les contraintes du projet, les problématiques rencontrées et les solutions apportées.

Nous aborderons dans cet article différents sujets. Dans un premier temps, nous évoquerons la nécessité de développer une méthodologie de conception basée sur l'analyse des fonctions hydraulique, géotechnique et structurelle afin d'adapter la conception à la variété des contraintes. Cette méthode, décrite par l'IRSTEA, a permis une conception adaptée, une optimisation des ouvrages et l'évaluation des risques résiduels. Elle a abouti au sectionnement des ouvrages en 200 tronçons d'une longueur moyenne de 450 m, ayant chacun une géométrie et une conception spécifique.

Dans un second temps, ce rapport abordera deux solutions techniques développées spécifiquement pour le projet. La première est le corps et spécifiquement le masque côté eau des digues, constitué de matériaux sableux du site traités au ciment et aux additifs. Ce masque doit assurer la stabilité du corps de l'ouvrage au glissement rotationnel, à l'érosion interne et l'étanchéité des ouvrages. L'optimisation de ce masque était essentielle pour maîtriser le coût économique et l'impact environnemental du projet. L'analyse des essais en laboratoire a permis de déterminer la formulation la plus adaptée et d'optimiser la géométrie du masque.

La deuxième est une solution de type « géosac plongeur », stabilisant le pied côté rivière des digues et protections de berges contre des profondeurs d'affouillement allant jusqu'à 11,30 m. La conception porte sur une solution technique composée de géosacs pesant environ vingt tonnes chacun. Ces géosacs sont reliés au corps de digue par des géocomposites. Lors d'un phénomène d'affouillement, les géosacs seront en mesure de s'enfoncer dans le lit mineur afin de stabiliser le pied de digue.

Mots-clés

El Niño, digues de protection contre les inondations, rivières à fonds sableux, remblai traité par ciment et additifs, géosac plongeur

Abstract

The South American Pacific coast is exposed to the El Niño phenomenon, which regularly causes major flooding. The last major floods occurred in 2017. In the wake of these events, major programmes to create flood protection systems are supported by the Peruvian State.

Since 2021, we have been working on one of these programmes, being in charge of producing the preliminary, detailed and construction designs for flood protection systems in two catchment areas, requiring the creation of 90 km of flood protection works. Our aim was to produce reliable, economically viable structures with as little environmental and social impact as possible.

This article provides feedback on the technical challenges encountered during the structural design. It summarises the constraints of the project, the problems encountered, and the solutions found.

This article covers different topics. Firstly, we discuss the need to develop a design methodology based on the analysis of hydraulic, geotechnical, and structural functions, to adapt the design to the variety of constraints. This method, described by IRSTEA, enabled the design to be adapted, the structures to be optimised and the residual risks to be assessed. It resulted in the division of the structures into 200 sections averaging 450 m in length, each with a specific geometry and design.

Secondly, this report will look at two technical solutions developed specifically for the project. The first is the body of the levees and specifically the waterside facing, made of sandy materials from the site treated with cement and additives. This facing must ensure the stability of the body of the structure against rotational sliding, internal erosion, and the watertightness of the structure. Optimising this facing was essential to control the economic cost and environmental impact of the project. The analysis of laboratory tests was carried out to determine the most suitable formulation and the most optimised geometry of the facing.

The second is a "sinking geobag" solution, stabilising the riverside toe of the levees and bank protection against scour depths of up to 11,30 m. The design involves a technical solution consisting of geobags weighing around twenty tonnes each. These geobags are connected to the body of the levees by geocomposites. In the event of scouring, the geobags will be able to sink into the riverbed to stabilise the toe of the levee.

Key Words

El Niño, flood protection levees, sandy riverbeds, cement and additives treated fill, sinking geobag

Conception et réalisation de l'aménagement hydraulique de la Turdine

Design and construction of the Turdine hydraulic engineering project

E. Remy¹, A. Salmi¹, M. Ribon², B. Cachot²

¹ ISL Ingénierie, Lyon, France, remy@isl.fr

² SYRIBT, L'Arbresle, France, marion.ribon@syribt.fr

Résumé

L'aménagement hydraulique de la Turdine, relevant du Syndicat de Rivières Brévenne et Turdine (SYRIBT), comprend deux ouvrages de ralentissement dynamique, implantés en cascade sur la Turdine, à l'amont de l'Arbresle (Rhône, 69). Les études de conception ont débuté en 2012, soit avant le décret n°2015-526 du 12 mai 2015. Elles ont intégré un travail important de concertation afin de s'assurer de l'acceptation sociale du projet. Les travaux ont eu lieu entre 2016 et 2021.

Les deux ouvrages présentent une conception globalement similaire avec :

- une digue en remblai zoné avec une recharge amont peu perméable,
- un évacuateur de crue de type déversoir à surface libre avec un coursier revêtu d'encroûtements maçonnés,
- un pertuis sous remblai en béton armé, aménagé pour faciliter le franchissement piscicole.

Chaque ouvrage de ralentissement dynamique composant l'aménagement hydraulique est décrit ci-après. Ils ont été conçus dans le cadre d'une opération de réduction du risque inondation commune, entre 2016 et 2021, et présentent des conceptions similaires.

Les emprises des retenues comprennent des terres agricoles exploitées, soit en pâturage pour le bétail, soit en culture et n'appartiennent pas au SYRIBT. Des conventions d'usage ont été établies avec les propriétaires. Elles prévoient une indemnisation pour perte d'exploitation en fonction de l'intensité et de la durée de la sur-inondation.

L'absence de maîtrise foncière de la retenue a eu une incidence forte sur le phasage et la conception. Les cuvettes des retenues n'ont pas été utilisées en zones d'emprunt pour fournir les matériaux nécessaires à la construction des barrages. L'impact financier sur le projet a été limité par valorisation de déblais de chantiers voisins (stock de déblais de l'autoroute A89 et matériaux d'excavation des parkings de la gare Part Dieu à Lyon) tout en s'inscrivant dans une démarche éco-responsable.

La concertation a fait ressortir l'importance de continuité écologique des basses eaux aux hautes eaux. Un travail important a été réalisé sur la conception des galeries pour atteindre cet objectif. Une réflexion a également été menée autour des bassins de dissipation des évacuateurs de crues et galeries pour limiter le réchauffement des eaux.

Les ouvrages ont enfin été conçus pour être adaptables et prendre en compte les effets du changement climatique, notamment en permettant de faire évoluer, si nécessaire, le débit relâché pour la crue de protection afin d'en optimiser l'efficacité.

Mots-clés

ralentissement dynamique, concertation, aménagement piscicole

Abstract

The Turdine hydraulic project, owned by SYRIBT, includes two cascading flood mitigation dams located on Turdine river, upstream of Arbresle town (Rhône, 69). The design studies began in 2012, *i.e.* before the decree n°2015-526 of May 12, 2015. They included extensive consultation to ensure project social acceptance. Works were performed between 2016 and 2021.

The two structures have a broadly similar design, with:

- A zoned embankment dam with low-permeability upstream shell,
- A free-surface spillway with a concreted rockfill conveyance structure,
- An underfill reinforced-concrete outlet gallery fit to facilitate fish passage.

Each flood mitigation dam layout making up the hydraulic project is described below. They were designed as part of a joint flood risk reduction operation between 2016 and 2021, and follow similar design.

The reservoirs land rights include farmlands that are used either for grazing livestock or for farming and does not belong to the SYRIBT. Use agreements have been established with the owners. They provide financial compensation for loss of use depending on the intensity and duration of the over-flooding.

The lack of land rights ownership had a major impact on the construction planning and the design. The reservoir areas were not used as borrow areas to supply the materials needed to build the dams. The financial impact on the project was limited by using excavated material from neighbouring sites (stockpiles of excavated material from the A89 motorway and excavated material from the car parks at Part Dieu train station in Lyon), while at the same time adopting an eco-responsible approach.

Consultation highlighted the importance of ecological continuity from low to high water level. A great deal of work was performed into the galleries design to achieve this goal. Consideration was also given to the spillway stilling basins and galleries to limit the warming of the water.

Lastly, the structures have been designed to be resilient and to take into account the climate change effects, in particular, if required, by allowing the flow released for the protective flood to be adjusted in order to upgrade their effectiveness.

Key Words

flood mitigation dam, consultation, fish passage bottom substrate

Conception et réalisation de la digue rétro-littorale
du bois de Sapins à la frontière entre le fluvial et le maritime
*Design and construction of the backshore seawall
of the Bois de Sapins at the limit between river and sea*

M. Grognet¹, J.F. Frezet¹, J. Simonis², A. Crapoulet³, M. Clouet⁴

¹ EGIS, Montpellier, France, matthieu.grognet@egis-group.com,
jean-francois.frezet@egis-group.com

² EGIS, Seyssins, France, jules.simonis@egis-group.com

³ CA2BM, Montreuil sur mer, France, a.crapoulet@ca2bm.fr

⁴ EGIS, Guyancourt, France, maxime.clouet@egis-group.com

Résumé

Inaugurée en octobre 2022 par la communauté d'agglomération des 2 Baies en Montreuillois (CA2BM), la digue rétro-littorale du Bois des Sapins protège contre la submersion marine une population de plus de 8 000 habitants sur les communes de Groffliers à Rang-du-Fliers (Pas-de-Calais). Ces travaux marquent la première étape de la mise à niveau du système d'endiguement Authie Nord dont le programme a été défini dans le cadre du PAPI Bresle-Somme-Authie.

Au droit de l'anse du Bois de Sapins, ce système d'endiguement est composé de deux ouvrages : le cordon dunaire et la digue rétro-littorale. Le cordon dunaire subit une érosion rapide depuis plusieurs décennies liées aux effets cumulés de la divagation de l'Authie et des assauts de la Manche. Malgré des rechargements annuels du cordon, l'ouverture d'une brèche n'est pas à exclure lors d'un épisode de tempête significatif.

La propagation de la houle à travers une brèche a été modélisée avec plusieurs outils pour caractériser les efforts hydrauliques sur l'ouvrage (houle et niveau d'eau). Le dimensionnement hydraulique et géotechnique a été réalisé dans le but d'assurer sa stabilité pour tous les modes de rupture concernés. La digue est protégée sur le talus côté mer par des enrochements de petite taille. Le corps de la digue est constitué d'un noyau peu perméable appuyé sur un remblai tout venant. Une clé d'étanchéité a été creusée sous l'ouvrage dans le but de réduire le risque d'érosion interne en fondation. Le noyau réalisé en craie R12, répond aux enjeux techniques en termes d'étanchéité et aux enjeux d'approvisionnement local en matériaux. En dépit des difficultés rencontrées lors des terrassements, les objectifs de perméabilité ont été atteints, et les spécifications de compactage respectées.

L'intégration de l'ouvrage dans son environnement a fait l'objet d'un effort particulier en collaboration avec le cabinet Paysagiste Atelier de l'Île. Les enrochements ont été recouverts de terre végétale et l'ouvrage est entièrement enherbé, les pentes variables et les noues paysagères atténuent l'aspect linéaire de l'ouvrage. L'entretien sera réalisé par une combinaison de pâturage ovin et par moyens mécaniques. Des chemins pédestres et équestres sont aménagés le long et sur l'ouvrage et permettront de relier Berck et le GR120 au nord de la baie d'Authie.

Pour mettre en œuvre ces travaux, la CA2BM a dû respecter un ensemble de prescriptions techniques, administratives et environnementales préalablement à l'obtention de l'autorisation préfectorale, comprenant notamment la mise en œuvre de mesures compensatoires.

Mots-clés

submersion marine, digue retro-littorale, cordon dunaire, craie, insertion paysagère

Abstract

Inaugurated in October 2022 by the 2 Baies en Montreuillois intermunicipality (CA2BM), the Bois des Sapins retro-coastal dike protects against marine flooding a population of more than 8,000 inhabitants in the municipalities from Groffliers until Rang-du-Fliers (Pas-de-Calais). This project marks the first step in upgrading the Authie Nord levee system, which was defined as part of the PAPI Bresle-Somme-Authie (action and prevention program against flooding).

At the Bois de Sapins cove, the protection is ensured by two structures: the dune belt and the retro-coastal dike. The dune belt has been undergoing rapid erosion for several decades linked to the cumulative effects of the wandering of the Authie river and the assaults of the English Channel. Despite annual sand furnishing of the dune belt, the opening of a breach cannot be excluded during a significant storm episode.

The propagation of the swell through a breach was modeled with several tools to characterize the hydraulic forces on the structure (swell and water level). The hydraulic and geotechnical design was carried out in order to ensure the stability for all the failure modes considered. The levee is protected on the seaside by small riprap. The body of the dike consists of a low permeable core supported by a mixed graded embankment. A sealing key was dug under the structure to reduce the risk of internal erosion. The core made of chalk, meets the technical challenges in terms of waterproofing and local sourcing of materials. Despite the difficulties encountered during earthworks, the permeability objectives have been reached, and the compaction specifications have been respected.

The visual integration of the structure was the subject of a special effort in collaboration with the landscape architect Atelier de l'Île. The riprap is covered with topsoil and the structure is entirely grassed, the variable slopes and variable width ditches attenuate the linear aspect of the structure. Maintenance will be carried out by a combination of sheep grazing and mechanical means. Hiking and equestrian paths are built along and on the structure and will connect Berck and the GR120 north of the Bay of Authie.

To implement this work, the CA2BM had to comply with a set of technical, administrative and environmental requirements prior to obtaining the prefectural authorization, including the implementation of environmental measures.

Key Words

coastal flooding, retro-coastal levee, dune belt, chalk, landscaping

Écrans d'étanchéité dans les levées de la Loire :
retour d'expérience sur 10 ans de « deep soil mixing »
*Cut-off walls in the Loire levees: 10 years' experience
of the "deep soil mixing" technique*

S. Patouillard¹, L. Saussaye², A. Le Kouby³, L. Gervais¹

¹ DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France,

sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

² Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France,

lucile.saussaye@cerema.fr

³ UGE, Paris, France, alain.le-kouby@univ-eiffel.fr

Résumé

En 2013, la DREAL Centre-Val de Loire a présenté les différentes techniques de renforcement des levées de Loire utilisées depuis la seconde moitié du XX^e siècle, ainsi que les perspectives attendues de chantiers expérimentaux d'écrans étanches en corps de digues. Ces chantiers ont permis la comparaison de plusieurs techniques de « soil mixing » (2012-2013). En 2019, un premier bilan de ce suivi expérimental à 5 ans ainsi que le retour d'expérience de plusieurs chantiers d'écrans étanches sur les levées de Loire ont été communiqués et présentés. Ces chantiers ont conduit à faire évoluer les approches de conception et de réalisation en exploitant la connaissance des sols (de la digue et de ses fondations) et de la nappe alluviale circulant dans les couches perméables du sous-sol.

Depuis lors, les renforcements de digues conduits sur la Loire avec cette technique se sont poursuivis et représentent plus de 32 km. Dans le cadre de travaux de recherche sur la thématique « Vulnérabilité des digues au changement climatique des digues de Loire », un écran a été instrumenté à Montlouis-sur-Loire, en Indre-et-Loire, lors de sa réalisation.

L'objet du présent article est de présenter un état des connaissances sur la base des résultats à 10 ans du suivi expérimental (pérennité, rendement, contraintes de mise en œuvre et moyens de contrôle) et de compléter le retour d'expérience sur les chantiers de plus grande ampleur qui ont permis d'adapter la technique (liant ciment ou chaux-ciment, apport en eau, critères de malaxage). L'article présente les conditions dans lesquelles la technique est adaptée mais aussi pointe les limites de son application (types de sols, profondeur, dimension du chantier). Il décrit l'instrumentation à Montlouis-sur-Loire de la levée de Tours Loire amont permettant de mesurer la température et la teneur en eau volumique du matériau sol-ciment en insistant sur deux points : la validation de la méthode d'exécution au moment de la réalisation de l'écran et le choix d'une procédure de suivi pour vérifier la pérennité de ses caractéristiques mécaniques et hydrauliques. L'instrumentation est complétée par 2 piézomètres et une station météorologique. De plus, pour le suivi à long terme, des matériaux ont été prélevés pour tester leur perméabilité. Un carottage dans l'écran a également été effectué 2 ans après sa réalisation et soumis aux mêmes types d'essais.

Mots-clés

digue, étanchéité, soil mixing, chaux, ciment

Abstract

In 2013, DREAL Centre-Val de Loire presented the various techniques used since the second half of the 20th century to reinforce the levees of the Loire, as well as the expected prospects for experimental projects involving deep soil mixing cut-off walls in levees. These projects have enabled several soil mixing techniques to be compared (2012-2013). In 2019, an initial assessment of this experimental monitoring after 5 years and feedback from several cut-off walls projects on the Tours and Orléans Loire levees were communicated and presented (see Image). These projects have led to changes in design and construction approaches, using knowledge of soils (of the levee and its foundations) and of natural circulation of the alluvial water table in the permeable layers of subsoil. DREAL CVL has used this technique to reinforce more than 30 km of dykes on the Loire. As part of research on "Vulnerability of dykes on the Loire River to climate change", a cut-off wall was instrumented at Montlouis-sur-Loire, in the Indre-et-Loire region, during its construction. The purpose of this article is to present the current state of knowledge based on the results of 10 years of experimental monitoring (durability, yield, implementation constraints and control methods) and to supplement the feedback from larger-scale projects that have enabled the technique to be adapted (cement or lime-cement binder, water input, mixing criteria). The article presents the conditions under which the technique is suitable, but also points out the limits of its application (types of soil, depth, size of site). It describes the instrumentation used on the Montlouis-sur-Loire levee to measure temperature and volumetric water contained in the soil-cement material, focusing on two points: validation of the execution method during cut-off wall works, and the choice of a monitoring procedure to check the durability of its mechanical and hydraulic characteristics. The instrumentation is completed by 2 piezometers and a weather station. In addition, for long-term monitoring, materials were sampled and tested using permeability tests. A core sample was also taken from the screen 2 years after its completion and tested the same way. The article also focuses on some solutions used to treat transition zones (other types of reinforcement, bridges and quays in particular).

Key Words

Levee, impermeability, soil mixing, lime, cement



Chantier d'écran « deep soil mixing » en tranchée à Varennes/Loire
(2021- dreal cvl/detl@drone expertise centre)

Deep soil mixing trench at Varennes/Loire
(2021- dreal cvl/detl@drone expertise centre)

**Ouvrages écrêteurs de crue protégeant les villes
de Fréjus et Saint-Raphaël :
construction des barrages d'Aspé et de Vaulongue**
*Flood retention dams in Fréjus and Saint-Raphaël:
construction of Aspé and Vaulongue dams*

G. Groell¹, M.-H. Prost¹, F. Fiquet-Albin², J. Rainaldi²

¹ ISL Ingénierie, Montpellier, France, groell@isl.fr, prost@isl.fr

² Estérel Côte d'Azur Agglomération, Saint-Raphaël, France,
f.fiquet@esterelcotedazur-agglo.fr, j.rainaldi@esterelcotedazur-agglo.fr

Résumé

Les effets des crues sur les villes de Fréjus et de Saint-Raphaël sont réduits par un aménagement hydraulique existant comprenant 4 bassins (Saint-Esprit, Cous, Peyron et Castellàs) dont 2 comprennent des barrages de classe B (h > 20 m). Malgré ces aménagements qui ont permis de réduire les débits de pointe de l'ordre de 30 %, les crues de 2006, 2011 et 2019 ont encore conduit à des débordements importants.

Estérel Côte d'Azur Agglomération, acteur Gémapien du secteur, est engagée dans un Programme d'Actions de Prévention contre les Inondations (PAPI). L'action 43 de ce PAPI vise à compléter le système par deux aménagements hydrauliques complémentaires identifiés de longue date dans le Schéma Directeur de lutte contre les Inondations : l'aménagement de Vaulongue et celui de l'Aspé pour un montant total d'environ 7,5 M€ HT.

L'aménagement de Vaulongue est en fin de construction (aménagements paysagers en cours). Il permet le stockage des apports d'un ruisseau affluent de la Garonne dans le lit majeur de la rive gauche de cette même rivière. La retenue est constituée par une digue périmétrale en remblai à étanchéité centrale (hauteur maximale de 5 m). L'aménagement est atypique par son fonctionnement, sa conception et son implantation en amont immédiat d'une zone urbaine dense.

Les travaux de l'aménagement de l'Aspé sont en cours jusqu'à juillet 2024. Il s'agit d'un barrage de 15,5 m de hauteur en enrochements à étanchéité amont par géomembrane. L'évacuateur de crues comporte des hausses fusibles. La démarche éviter/réduire/compenser a notamment conduit à une conception atypique du pertuis de fond : la longueur du pertuis couvert a été limitée à 20 m alors que la largeur du remblai amont/aval est de 70 m. Ce résultat a conduit à réaliser des voiles butonnés allant jusqu'à 12 m de hauteur.

L'article présente les aménagements existants et les aménagements en construction (Vaulongue et Aspé). Il détaille l'influence des nombreuses contraintes foncières, environnementales et d'usage sur la conception et la construction des ouvrages.

Ces contraintes ont en effet nécessité des travaux environnementaux préparatoires, des adaptations techniques, un phasage des travaux et un suivi environnemental poussé. Enfin, un suivi assidu est prévu lors de la mise en service pour s'assurer du bon comportement structurel des ouvrages et de l'adéquation du document d'organisation et des moyens nouveaux mis en place par le gestionnaire pour suivre ces nouveaux ouvrages.

Mots-clés

aménagement hydraulique, écrêteur, études environnementales

Abstract

Flood effects on Fréjus and Saint-Raphaël are reduced by four flood retention dams (Saint-Esprit, Cous, Peyron et Castellás) including two large dams higher than 20 meters high.

Recent floods (2006, 2011, 2019) have led to severe flooding, despite the reduction by 30 % of the peak flow thanks to these dams. Estérel Côte d'Azur Agglomération (ECAA) oversees the flood management in the watershed. It has started the construction of two new dams which have been identified for a long time: Vaulongue and Aspe dams. The total construction cost is about 7,5 millions euros.

Vaulongue dam is nearly constructed. It allows to control flood of a left bank tributary of Garonne river. The dam is a 5 m high homogenous embankment dam with a central impervious cut with sheet piling. The design and the location of the dam right upstream a dense urban area make the dam particular.

Aspe dam is under construction until July 2024. It is a 15,5 m high rock-fill dam with an upstream waterproof geomembrane. The spillway is composed of two fusegates. Environmental studies have led to a specific design of the bottom outlet: the length of the bottom outlet should not exceed 20 m for the aquatic fauna to have enough luminosity. The width of the rock-fill dam at its base is about 70 m. It led to the design of 12 m high strut walls.

The article presents the existing dams and the dams under construction. It describes the impact of the numerous constraints on the design and the construction of the dams.

Thus, these constraints have led to preliminary environmental works, technical adaptations and an intense environmental monitoring during the construction.

Once these new dams are implemented, a specific monitoring is planned to check the structural behavior and the new organization of ECAA.

Key Words

Flood retention, dams, environmental studies

REX du chantier de renforcement de la levée de Tours Loire Aval à La Riche, par épaissement côté val et filtre granulaire
Feedback from the reinforcement of the Tours Loire Downstream levee at La Riche, by thickening with granular filter

G. Debien¹, S. Patouillard²

¹ DREAL Centre-Val de Loire (DETL), Tours, France,
guillaume.debien@developpement-durable.gouv.fr

² DREAL Centre-Val de Loire (DETL), Orléans, France,
sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

Résumé

À la suite d'études de fiabilisation de la digue de Tours Loire Aval, conduites en 2020, un programme de travaux est mis en place sur la commune de La Riche (Indre-et-Loire) afin de fiabiliser plusieurs centaines de mètres de digues, sur quatre secteurs avec des zones de transition remarquables (digue historique / digue contemporaine / remblai routier et ferroviaire). Les travaux font suite à la réalisation d'écrans étanches en corps de digue sur une partie de ces mêmes zones deux ans plus tôt. Pour compléter ce renforcement, un épaissement de la digue est mis en œuvre comprenant la mise en place d'une couche de sable sur géotextile faisant office de filtre granulaire. L'objectif est ainsi de filtrer l'eau circulant au travers du corps de digue pour ne laisser passer qu'une eau claire ayant un faible potentiel d'érosion. Cette eau est alors acheminée vers un drain créé en pied de digue côté val. L'épaissement, quant à lui, a aussi pour objectif d'adoucir la pente de la digue pour ainsi renforcer sa stabilité et sa durabilité. Les travaux comprennent enfin la mise en place d'un grillage anti-fouisseurs (blaireaux notamment) en surface. Ces travaux sont par ailleurs l'occasion de purger des espèces envahissantes présentes sur site, notamment la renouée du Japon, remplacées par un ensemencement d'espèces sélectionnées spécialement. Au-delà de l'intérêt pour la biodiversité, la présence de plantes en surface de digue permet de fixer et de renforcer la couche de terre végétale grâce à son réseau racinaire. Ces travaux sont réalisés entre janvier et mai 2023. Si le principe des travaux est relativement simple, l'exécution en revanche se révèle plus complexe avec notamment la difficulté de bien réaliser le compactage en raison de la qualité et parfois du manque d'homogénéité des matériaux et de leur état hydrique, variable au fur et à mesure de l'avancée du chantier. Le plan de contrôle mis en place pendant toute la durée du chantier s'avère lourd et contraignant pour une exécution rapide du chantier. En revanche, malgré des résultats de tests parfois équivoques, les contrôles effectués montrent toute leur pertinence pour la bonne exécution des travaux.

Mots-clés

digue, levée, Loire, renforcement, filtre

Abstract

Following studies to improve the reliability of the Tours Loire downstream levee in 2020, a program of works is set up at La Riche (Indre-et-Loire) in four areas (several hundred meters) with outstanding transition zones (historic levee / contemporary levee / road and railway embankment). The work follows the construction of cut-off walls in the levee's corpse on a part of the same areas. To complete the reinforcement of these sectors, a thickening of the levee is implemented with a layer of sand on geotextile to act as a granular filter. The purpose is to filter the water flowing through the body of the levee, leaving only clear water with a low erosion potential. This clear water is then led into a drain created at the foot of the levee on the valley side. Thickening, on the other hand, aims at softening the slope of the dike to reinforce its stability and durability. Lastly, the works include the installation of an anti-furrowing mesh (mainly against badgers) on the surface. The works also provide an opportunity to purge the site of invasive species such as Japanese knotweed, which are replaced by the seeding of specially selected species. In addition to the benefits for biodiversity, the presence of plants on the surface of the levee helps to fix and strengthen the layer of topsoil thanks to its roots. Works were carried out between January and May 2023. If the works principle is relatively simple, it was more complex to execute, in particular it was difficult to ensure proper compaction due to the materials quality, because of the lack of homogeneity and hydric state, which varied as the works progressed. The control plan put in place for the entire duration of the project happened to be cumbersome and restrictive in terms of rapid completion. On the other hand, despite the sometimes equivocal test results, the checks carried out are fully relevant to the proper execution of works.

Key Words

Levee, dyke, Loire, reinforcement, filter



Montage d'un filtre granulaire par épaisseur
du talus côté val de la levée de Tours

Building of a granular filter by thickening on the valley side of the Tours levee

**Rivière des galets sur l'île de la Réunion –
Retour d'expérience après passages de cyclones sur les confortements
par blocs artificiels attachés**

***Pebble river on Reunion Island – Feedback following cyclonic storms
on reinforcement using attached artificial blocks***

J. Vanwarreghem¹, A. Quanquin¹

¹ BRLingénierie, Nîmes, France, julien.vanwarreghem@brl.fr

Résumé

L'île de la Réunion détient des records mondiaux de pluviométrie. Les rivières de l'île subissent des crues violentes de forte capacité érosive et des vitesses pouvant dépasser les 8m/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 plusieurs épisodes cycloniques, la partie endiguée, jugée trop lisse, ainsi que certains épis ont été attaqués en pied par les crues de manière plus importante que les prévisions. Afin de conforter ces ouvrages, le concept novateur des digues répulsives a été appliqué au droit des endiguements et de certains épis. Il prévoit par la mise en œuvre de blocs béton de forme cubique équipés de réservations permettant le passage de câbles de liaison entre éléments.

Les travaux se sont déroulés d'avril 2018 à décembre 2022 et ont concerné environ 1 250 ml de berges et 3 épis pour un budget total de 18 millions d'euros. Ils ont consisté à prolonger les protections actuelles sur environ 5 m de profondeur, ce qui a mobilisé environ 5 500 blocs cubiques de béton de 1,5 m de côté, 27 km de câble inox de 24 mm de diamètre et 700 000 m³ de terrassements essentiellement constitués de galets et de blocs rocheux.

Suite aux cyclones de 2021 et 2022, et notamment le passage du cyclone Batsiraï qui a été accompagné de fortes précipitations entraînant une crue de la rivière des Galets (débit de pointe évalué à 472 m³/s), les confortements ont été sollicités (impact sur le comportement des écoulements durant la crue, impact sur le comportement des écoulements suite aux travaux, phénomène d'abrasion, instabilités sur certaines parties d'ouvrage...). Ces événements permettent de tirer un premier retour d'expérience à la fois sur la composition des blocs et la configuration des aménagements.

Mots-clés

écoulement torrentiel, transport solide, blocs béton, digue répulsive, retour d'expérience

Abstract

Reunion Island holds rainfall world records. The island's rivers are subject to violent flooding, with strong erosive capacity and speeds that can exceed 8 m/s. The Pebble River flows through urbanized areas threatened by flooding every year.

In the 1990s, with the support of physical models, major development projects were launched. The twenty-meters-high banks were protected by concrete riprap embankments downstream and diverter groynes upstream.

Following several cyclonic storms, the diked section, considered too smooth, and some of the groynes were attacked at the foot by floodwaters to a greater extent than forecast. In order to reinforce these structures, the innovative concept of repulsive dikes was applied to the dikes and certain groynes, using cubic concrete blocks fitted with recesses for the passage of connecting cables between elements.

The work took place from April 2018 to December 2022 and involved around 1,250m of embankments and 3 groynes for a total budget of 18 million euros. It involved extending the existing protections to a depth of around 5 m, mobilizing some 5,500 cubic concrete blocks measuring 1.5m on each side, 27km of 24mm-diameter stainless steel cable and 700,000 m³ of earthworks, mainly consisting of cobbles and boulders.

Following the cyclones of 2021 and 2022, and in particular the passage of cyclone Batsiraï, which was accompanied by heavy rainfall leading to flooding of the Pebble River (peak flow estimated at 472 m³/s), the reinforcements were put to the test (impact on flow behavior during flooding, impact on flow behavior following construction, abrasion phenomena, instabilities on certain parts of the structure, etc.), enabling us to draw initial feedback on both the composition of the blocks and the configuration of the structures.

Key Words

torrential flow, solid transport, concrete block, repulsive dike, feedback

Principes et techniques de confortement
et de réparation des digues
*Principles, methods and techniques for reinforcing
and repairing flood protection levees*

**B. Beullac¹, R. Tourment¹, Y. Boussafir², C. Chevalier², Y. Deniaud³,
S. Patouillard⁴, L. Saussaye⁵**

¹ RECOVER, INRAE, Aix-en-Provence, France, bruno.beullac@inrae.fr

² Université Gustave Eiffel, Marne la Vallée, France,
yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr

³ Cerema, Plouzané, France, yann.deniaud@cerema.fr

⁴ DREAL Centre Val de Loire, Orléans, France,
sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

⁵ Research Team ENDSUM, Cerema, Blois, France, luclie.saussaye@cerema.fr

Résumé

Les digues de protection contre les inondations sont souvent d'anciens ouvrages qui n'ont pas été correctement gérés et entretenus pendant de longues périodes. Dans de nombreux pays, les inondations des dernières décennies ont montré l'importance d'une bonne gestion et bien sûr d'un bon état de ces ouvrages qui sont essentiels à la sécurité des biens et des personnes qu'ils protègent. Après un recensement et une évaluation des patrimoines nationaux suivis de diagnostics des ouvrages, il s'avère que, pour nombre de ces digues, d'importants travaux de réhabilitation sont nécessaires pour assurer la performance et la sûreté de ces ouvrages. Après des crues, des tempêtes, des tremblements de terre ou des accidents, il est souvent nécessaire de réparer les digues existantes. Compte tenu des spécificités des digues de protection contre les inondations, il existe un fort besoin de connaissances et de méthodes sur la conception et la mise en œuvre des travaux des renforcements et des réparations. Le CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) traite des questions liées aux digues depuis 2004 et un groupe de travail (GT) du CFBR sur le renforcement et la réparation des digues a été créé en 2014. Son livrable est un rapport substantiel présentant l'approche globale de la réhabilitation, du renforcement et de la réparation des digues existantes, depuis l'évaluation et le diagnostic jusqu'à la conception puis à la mise en œuvre. Il est disponible sur le site web du CFBR en langue française et sera disponible en anglais courant 2023. L'article présentera en introduction une situation générale des ouvrages et systèmes de protection contre les crues en France. Il présente ensuite les principes généraux de conception des réparations ou des renforcements de digues présentés dans la première partie du rapport, ainsi que certaines des techniques spécifiques présentées dans la deuxième partie du rapport. Enfin, l'article présente en conclusion les perspectives de travaux méthodologiques sur ces thèmes : au niveau français la continuation et l'évolution du GT CFBR ainsi qu'au niveau international les objectifs du Comité Technique sur les Digues de la Société Internationale de Mécanique des Sols et de la Géotechnique (SIMSG).

Mots-clés

digue, confortement, réparation, technique, travaux

Abstract

Flood protection levees are often old structures that have not been properly managed and maintained for long periods of time. In many countries, flood events in recent decades have shown the importance of a proper management. After an assessment of national portfolios, it is found that, for many of these levees, important retrofitting works are necessary to ensure performance and safety of these structures. After flood events, earthquakes or accident, it is often necessary to repair existing levees. Given the specificities of flood protection levees, there is a strong need for guidance on the design and implementation of reinforcement and repair works. CFBR (the French Committee on Dams and Reservoirs) has been addressing levees related issues since 2004 and a CFBR working group (WG) on reinforcement and repair of levees was set up in 2014. Its deliverable is a substantial report presenting the overall approach to reinforcement and repair of existing levees, from assessment and diagnosis to design and then implementation. It is available on CFBR's web site in French language and will be available in English in 2023. Future editions of this document are planned to include additional and innovative solutions. The paper presents as an introduction a general situation of flood protection structures and systems in France. It then presents the general design principles for levee repairs or reinforcements presented in the first part of the report, as well as some of the specific techniques presented in the second part of the report. Then, the article presents in conclusion the perspectives of methodological work on these themes: at the French level the continuation and the evolution of the CFBR WG as well as at the international level the objectives of the Technical Committee on Levees of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

Key Words

levee, reinforcement, repair, technic, works

Guidage GPS appliqué à la méthode « Q/S » pour le contrôle du compactage *GPS guidance applied to the "Q/S" method for compaction control*

M. Bufalo¹, G. Couturier², J.M. Polje³

¹ Spie batignolles valerian, Sorgues, France, maurice.bufalo@spiebatignolles.fr

² GUIDAIDE, Saint Esteve, France, geral.couturier@neuf.fr

³ GUIDAIDE, Saint Esteve, France, jm.polje@guidaide.com

Résumé

La qualité du compactage des sols en remblais constitue un paramètre essentiel pour garantir la pérennité des ouvrages hydrauliques en terre. Un des critères est l'obtention de la masse volumique prescrite de façon homogène sur l'ensemble du remblai.

Depuis la parution des Recommandations pour les Terrassements Routiers (RTR 1976), le compactage des remblais en France est contrôlé par la méthode empirique dite du « Q/S » qui permet de s'affranchir des contrôles directs de compacité. Cette méthode consiste à s'assurer que le terrassier a déployé les moyens en matériel de compactage nécessaires et suffisants pour atteindre l'objectif de compactage. Cette méthode ne garantit ni le respect du plan de balayage des compacteurs ni celui des épaisseurs de couches de remblai, ce qui peut générer des points de faiblesse dans l'ouvrage.

L'application de la méthode « Q/S » montre aussi ses limites du fait d'une pénurie constatée des enregistreurs de type tachygraphes sur les compacteurs de location d'une part, et la nécessité de traiter manuellement les données pour assurer une traçabilité rigoureuse d'autre part.

Les technologies actuelles en matière de guidage GPS nous ouvrent des perspectives que la communauté concernée par les ouvrages en terre ne peut plus ignorer.

Le système COMPACT 3D développé par la société française GUIDAIDE propose une approche innovante du pilotage du compactage par GPS. Ce système d'un cout raisonnable intègre les consignes du GTR, qui a succédé à la RTR en 1992, et s'installe et se désinstalle en quelques dizaines de minutes. Il se substitue au tachygraphe et permet :

- de contrôler le nombre de passes, la vitesse, les épaisseurs de couches et le balayage du compactage,
- d'enregistrer le lieu de compactage en l'absence de piquet topographique,
- de produire les fiches de contrôle automatiquement,
- de produire une maquette 3D du remblai.

Il a été déployé pour la première fois sur les digues du Symadrem entre Tarascon et Arles, puis appliqué avec succès sur d'autres chantiers. Le pilotage par GPS du compactage consolide la méthode « Q/S » en proposant une réponse simple et efficace pour corriger ses points faibles.

L'application du guidage GPS relève actuellement de démarches volontaires des entreprises. À l'initiative des donneurs d'ordres, elles pourraient avantageusement devenir systématiques sur certains chantiers.

Mots-clés

compactage, GTR, Guidage GPS, méthode Q/S, maquette 3D

Abstract

The quality of soil compaction in embankments is an essential parameter to guarantee the durability of hydraulic earthen structures. One of the criteria is the obtaining of the density prescribed homogeneously over the entire backfill. Since the publication of the Recommendations for Road Earthworks (RTR 1976), the compaction of embankments in France has been controlled by the empirical method known as "Q/S" which makes it possible to dispense with direct controls of compactness. This method consists in ensuring that the earthworker has deployed the necessary and sufficient means of compaction equipment to achieve the compaction objective. This method does not guarantee compliance with the compactors' sweeping plan or that of the thicknesses of the backfill layers, which can generate points of weakness in the structure. The application of the "Q/S" method is also showing its limitations due to a shortage of tachograph type recorders on rental compactors on the one hand, and the need to manually process data to ensure rigorous traceability on the other. Current GPS guidance technologies open up opportunities that the earthen community can no longer ignore. The COMPACT 3D system developed by the French company GUIDAIDE offers an innovative approach to GPS compaction control. This reasonably expensive system incorporates the instructions of the GTR, which succeeded the RTR in 1992, and can be installed and uninstalled in a few tens of minutes. It replaces the tachograph and allows:

- control the number of passes, speed, layer thicknesses and compaction sweep,
- record the compaction site in the absence of a topographic stake,
- produce the control sheets automatically,
- produce a 3D model of the embankment.

It was deployed for the first time on the Symadrem dikes between Tarascon and Arles, then successfully applied on other sites.

GPS compaction control consolidates the "Q/S" method by offering a simple and effective response to correct its weak points. The application of GPS guidance is currently a voluntary approach by companies. At the initiative of contractors, they could advantageously become systematic on certain sites.

Key Words

compaction, GTR, GPS guidance, Q/S method, 3D model

Retour d'expérience des travaux de digues du site pilote de La Bassée *Feedback on dyke work at the La Bassée pilot site*

A. Valenziano¹, S. Palix¹, P. Laugier², N. Riot³

¹ Antea Group, Olivet (45), France, alexandre.valenziano@anteagroup.fr

² EPTB Seine Grands Lacs, Paris (75), France, pascal.laugier@seinegrandslacs.fr

³ Terélian, Rueil Malmaison (92), France, nicolas.riot@vinci-construction.com

Résumé

Le site pilote de La Bassée est le premier ouvrage écrêteur de crue d'un ensemble de neuf espaces endigués localisés dans le lit majeur de la Seine. Cette opération consiste en la création d'un espace d'environ 4 km², ceinturé par un remblai périphérique (dit « digue »), dont la fonction est de stocker temporairement les eaux de la Seine lors des crues majeures pour permettre une diminution de la ligne d'eau en aval et réduire les dommages socio-économiques dus aux inondations en Ile-de-France. Outre cette fonction hydraulique, cette opération de travaux a également pour objectif la valorisation écologique de la zone humide de la Bassée. Les travaux prévoient notamment :

- la réalisation de 7,6 km de remblais (« digues ») offrant une capacité de stockage de 10 Mm³ ;
- la création d'une station de pompage en Seine d'une capacité de 42 m³/s ;
- la création de deux stations de relevage permettant de limiter les impacts piézométriques locaux.

Le site pilote est considéré comme un aménagement hydraulique et un barrage de classe C. Les travaux ont débuté au printemps 2022, pour une fin prévisionnelle à l'été 2024.

Les travaux sont réalisés sous la maîtrise d'ouvrage de l'EPTB Seine Grands Lacs. La maîtrise d'œuvre de conception était assurée par le groupement Setec, Artelia, Ecosphère, Ateliers 234. La maîtrise d'œuvre d'exécution pour les travaux d'aménagement hydraulique est assurée par le groupement Antea Group (Mandataire), BRL Ingénierie, Sandrine Hurtaux Architecte et Vert Latitude. Plus d'une vingtaine de lots de travaux ont été attribués avec notamment l'attribution du lot « digues et terrassements » à un groupement d'entreprises de Vinci Construction (Terélian, Sogea Est, Soletanche-Bachy, Chantiers Modernes Construction).

La présentation exposera les différents enjeux liés à l'exécution des travaux d'un ouvrage hydraulique en milieu fluvial, confronté à des contraintes de multiples natures, en cas de crue de la Seine et de fonctionnement du site pilote. Les dispositions prévues en phase conception et les adaptations rendues nécessaires en phase travaux seront présentées. Il sera spécifiquement abordé les évolutions liées aux préparations des assises des remblais périphériques, aux modalités de remblaiement en eau, aux « drains actifs » et à la mise en œuvre d'écrans étanches. Pour finir, l'article traitera des difficultés rencontrées pour assurer l'approvisionnement en matériaux de corps de digue et les modalités de suivi dans le cadre d'une opération nécessitant plus d'un million de tonnes de matériaux.

Cette présentation associera les regards du Maître d'Ouvrage, du Maître d'œuvre exécution et des entreprises de travaux.

Mots-clés

barrage, La Bassée, travaux, terrassement, fluvial

Abstract

The La Bassée pilot site is the first of a series of nine flood control structures located in the major riverbed of the Seine. This operation involves the creation of an area of around 4 km², surrounded by a dyke, the purpose of which is to temporarily store the waters of the Seine during major floods, thereby lowering the water level downstream and reducing socio-economic damages caused by flooding in the Ile-de-France region. In addition to this hydraulic function, the works also aim to enhance the ecological value of the Bassée wetlands. The different works include:

- Building 7.6 km of dykes with a storage capacity of 10 Mm³ ;
- The creation of a pumping station in the Seine with a capacity of 42 m³/s ;
- The creation of two lifting stations to limit the impact of local piezometric levels.

The pilot site is a class A hydraulic facility and a class C dam. Works began in spring 2022, with completion scheduled for summer 2024.

The works are being carried out under the project management of EPTB Seine Grands Lacs. The Setec, Artelia, Ecosphère and Ateliers 234 consortium was responsible for the design. Project management for the hydraulic engineering works is being carried out by the Antea Group (lead contractor), BRL Ingénierie, Sandrine Hurtaux Architecte and Vert Latitude. More than twenty works packages have been awarded, including the "dykes and earthworks" package to a consortium of Vinci Construction companies (Terélian, Sogea Est, Soletanche Bachy, Chantiers Modernes Construction).

The presentation will set out the various issues involved in carrying out works on a hydraulic structure in a river environment, faced with a wide range of constraints, in case of Seine floods and operation of the pilot site. The measures planned during the design phase and the adaptations made necessary during the construction phase will be presented. Specific attention will be paid to changes relating to the preparation of subgrades, backfilling with water, active drainage and the use of impermeable screens. Finally, the article will look at the difficulties encountered in securing supplies of materials for the body of the dyke and the methods of monitoring in the context of an operation requiring more than one million tonnes of materials.

This presentation will bring together the views of the project owner, the project manager, and the works contractors.

Key Words

dam, La Bassée, works, earthworks, fluvial

Réalisation des travaux de confortement sur le système d'endiguement
de la Fosse aux Carpes (classe C)
situé en rive droite de la Seine à Draveil (91)
*Implementation of strengthening works on Fosse aux Carpes' diking
system (class C) located on the right bank
of the Seine in Draveil*

**M. Delbec¹, J. Lelieux¹, S. Criscione², S. Ponen²,
E. Chalaux², J. Cau¹, C. Hoyaux³**

¹ PROLOG INGENIERIE, Paris, France, delbec@prolog-ingenierie.fr

² SyAGE – Syndicat mixte pour l'Assainissement et la Gestion des Eaux du bassin versant Yerres-Seine, EPAGE du bassin versant de l'Yerres, Montgeron, France, syage@syage.org

³ SCE Aménagement et Environnement, Montrouge, France, cyrille.hoyaux@sce.fr

Résumé

Le système d'endiguement de la Fosse aux Carpes est situé en rive droite de la Seine, sur la commune de Draveil, dans le département de l'Essonne, à 30 km à l'amont de Paris. Le gestionnaire du système, au titre de sa compétence GEMAPI, est le SyAGE. Ce dernier a engagé en 2021 les démarches visant à classer et autoriser l'ouvrage en tant que système d'endiguement de classe C au titre de l'article R.562-13 du Code de l'Environnement.

Les investigations et le diagnostic structurel en état actuel ont confirmé l'état fortement dégradé de l'ouvrage, déjà constaté lors d'études antérieures. Les mécanismes de rupture identifiés, dès les crues fréquentes de la Seine (période de retour inférieure à 10 ans), sont l'érosion interne et le glissement du talus amont. Le SyAGE a donc décidé de réaliser en urgence des travaux de confortement, et en accord avec les services de l'État, de procéder à la régularisation du système d'endiguement selon une procédure d'autorisation simplifiée avec travaux.

Ces derniers sont à réaliser sur un site naturel concerné par un arrêté de protection de biotope. En conséquence, des contraintes fortes de protection du site se sont imposées dans le choix des techniques à mettre en œuvre, dans les périodes de réalisation du chantier, et dans le suivi des impacts en phase travaux.

Les travaux consistent en l'arasement de la digue existante sur 1 m environ avec la réalisation d'une plateforme contribuant à la stabilité d'ensemble, la prévention de l'érosion interne par un écran étanche en pieux sécants, une stabilisation du talus côté Seine par un reprofilage à 5H/3V et la pose d'une protection filtrante et drainante.

Mots-clés

système d'endiguement, travaux de confortement, écran étanche,
pieux sécants, étude de dangers

Abstract

The Fosse aux Carpes's diking system is located on the right bank of the Seine, in the municipality of Draveil, in the Essonne department, 30 km upstream from Paris. The system manager, in accordance with their GEMAPI (Management of the Aquatic Environment and Flood Prevention) skill, is the SyAGE (mixed Syndicate for Sanitation and Water Management of Yerres' watershed). In 2021, the latter committed to procedures to rank et allow the facility as a diking system under the article R.562-13 of the Environmental Code.

Various investigations and the structural diagnostic in the current state confirmed the facility's highly degraded state, already noticed in previous studies. The identified breach mechanisms, from frequent floods of the Seine (return period lower than 10 years) are internal erosion and the upstream slope failure. The SyAGE thus decided to urgently carry out strengthening works, in accordance with the government services, to proceed to the regularization and authorization of the diking system following a work procedure.

The works are to be done in a natural site concerned by a biotope protection order. Consequently, strong constraints about the site protection imposed themselves in the choice of techniques to use during the period of realization of the project, and in the work phase impact follow-up.

The works consists in the leveling of the existing dike over approximately 1 m with the creation of a platform contributing to overall stability, prevention of internal erosion by a watertight screen made of secant piles, stabilization of the Seine side bank by reprofiling at 5H/3V and installing filtering and draining protection.

Key Words

diking system, strengthening works, secant pile wall, hazard study

Retour d'expérience des travaux de sécurisation du barrage du Ruchol et construction du barrage des Arques

Feedback of rehabilitating the Ruchol dam and the construction of the Arques dam

D. Bosch¹, O. Munoz¹, A. Salmi¹

¹ ISL Ingénierie, Castelnau-le-Lez, France,
bosch@isl.fr, munoz@isl.fr, salmi@isl.fr

Résumé

En novembre 1999, le département de l'Aude (France) a été sévèrement touché par un événement hydrologique exceptionnel, encore considéré comme l'évènement de référence sur la partie Est du département.

Le barrage du Ruchol (classe C, h = 10,2 m) actuellement sous la gestion du Syndicat Mixte Aude Centre, est situé sur la commune de Laure-Minervois (propriétaire de l'ouvrage). Il a été construit sur la rivière du Ruchol entre 1985 et 1986 pour constituer un plan d'eau dédié aux loisirs.

Lors de l'épisode de 1999, il a été endommagé (sans rompre) par une surverse générale sur la crête avec une lame d'eau estimée à 0,4 m. Des premiers travaux de confortement et d'augmentation de la capacité d'évacuation de crues ont été réalisés dans les années 2000.

En 2010, une actualisation de l'hydrologie conclut que la capacité de l'évacuateur, de l'ordre de 100 m³/s, doit être portée à 143 m³/s pour la crue de projet et 213 m³/s pour la crue extrême pour se conformer aux recommandations du CFBR (plus sévère que celles imposées plus tard par l'ATB 2018). La solution proposée fait appel à un évacuateur de type « piano key weir ».

En parallèle, l'étude de la protection de la ville de Laure-Minervois, sévèrement touchée par la crue de 1999, conclut sur l'opportunité de transformer le barrage du Ruchol en ouvrage de protection contre les crues en l'associant à un nouvel ouvrage écrêteur à édifier sur un confluent du Ruchol : le barrage des Arques (Classe C, h = 10,50 m).

Les travaux de sécurisation du barrage du Ruchol et de construction du barrage des Arques ont été réalisés entre 2021 et 2023. Ils constituent aujourd'hui l'aménagement hydraulique assurant la protection de la commune de Laure-minervois.

L'objectif de cette publication est de faire part de cette expérience sur les plans techniques, réglementaires et en matière de travaux.

Mots-clés

barrage en remblai, retour d'expérience, écrêteur, crue, piano key weir

Abstract

On November of 1999, an exceptional hydrologic event impacted the French department of Aude. This event is still considered as the reference event in the eastside of the department.

The Ruchol dam (class C, $h = 10.20$ m) is being managed by the “Syndicat Mixte Aude Centre” and is in the city of Laure-Minervois. It was built on the Ruchol river between 1985 and 1986 to create a leisure lake. During the 1999 event, the dam was damaged (without breaking) by a global overflow with a water sheet estimated around 40 cm. First strengthening works and spillway capacity increase occurred during the 2000s.

In 2010, a new hydrologic study states that the spillway capacity around $100 \text{ m}^3/\text{s}$ must be increased to $143 \text{ m}^3/\text{s}$ for the project flood and $213 \text{ m}^3/\text{s}$ for the extreme flood, according the CFBR recommendations (more severe than the ATB 2018, published later).

The solution foreseen is to build a “piano key weir” spillway. On the same time, studies about the protection against floods of the city of Laure-Minervois, which has been toughly impacted by the 1999 event, show the opportunity to transform the Ruchol dam in a flood retention dam associated with a new dam on a confluence river of the Ruchol: the Arques dam (class C, $h = 10.50$ m).

The rehabilitation of the Ruchol dam and the construction of the Arques dam took place between 2021 and 2023. Nowadays, those two dams ensure the flood protection of the city of Laure-Minervois.

The aim of this publication is to give feedback of the project about the technical design, the regulatory aspects and the civil work phase.

Key Words

earthfill dam, feedback, civil works, flood protection dam, piano key weir

Conception et réalisation de la protection périphérique contre les risques d'inondations externes pour le CNPE du Blayais

Design and construction of peripheral protection against the risks of external flooding for the Blayais CNPE

C. Chancel¹, C. Coll¹, F. Brousset¹, N. Aymard², C. Brunet², P. Tachker², N. Dutailly³, B. Nénert³, J. Varillon³, P. Burtin⁴, Y. Rouzier⁴, A. Tigoulet⁵

¹ ARTELIA, Echirrolles, France, chloe.chancel@arteliagroup.com

² EDF-CNEPE, Tours, France, nicolas.aymard@edf.fr

³ VINCI Construction Terrassement, Rueil Malmaison, France, jerome.varillon@vinci-construction.com

⁴ MENARD, Chaponost, France, pierre.burtin@menard-mail.com

⁵ TERRE ARMEE, Rueil-Malmaison, France, alain.tigoulet@terre-armee.com

Résumé

Depuis sa construction, le Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) du Blayais a été protégé de l'inondation externe par submersion marine par un système composé de deux parties : une première en front de Gironde et une seconde ceinturant le site et fermant les venues d'eau par les marais environnants. Cette seconde partie fait l'objet de la présente communication. L'ensemble de cette protection a nécessité, au fur et à mesure des retours d'expérience nationaux et internationaux (réchauffement climatique, tempêtes Martin, Katrina, Xynthia et tsunami de Fukushima), des réévaluations du niveau de protection pour aboutir à la prise en compte de la conjonction de phénomènes rares : Plus Haute Marée Astronomique, surcote d'occurrence millénaire, majoration forfaitaire du niveau marin, vent centennal, direction des vagues défavorable et, en provision, une majoration forfaitaire pour couvrir l'évolution du niveau marin liée au changement climatique. Ces réévaluations ont conduit à devoir redimensionner une nouvelle protection permettant de contrôler les différentes venues d'eau (franchissements par paquets de « mer », infiltrations, fuites à travers les réseaux enterrés) en accord avec les préconisations du guide 13 de l'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN) et limiter ainsi le volume d'eau susceptible de pénétrer dans l'enceinte de la protection à une valeur admissible. ARTELIA, VINCI Construction Terrassement et MENARD, en groupement, ont proposé un compromis original et innovant de digue en matériaux traités à la chaux vive sur inclusions rigides avec un écran étanche en fondation protégée par une carapace en enrochement pour permettre de garantir la stabilité des ouvrages sur une durée de 40 ans et s'adapter à la complexité du site (géologie et emprise). Dans les zones d'emprises très limitées empêchant la réalisation d'une digue à talus classique, une solution de digue constituée d'un mur de soutènement en remblai renforcé a été mise en place (côté centrale). Ces solutions se sont avérées le meilleur compromis trouvé face aux différentes contraintes et ont généré des défis à relever pendant les études pour démontrer la robustesse de l'ouvrage, à savoir :

- limiter les volumes de franchissement par la houle et le clapot,
- garantir l'étanchéité de l'ouvrage et limiter les volumes d'infiltrations à travers la digue, sa fondation et les conduites enterrés (by-pass),
- éliminer les risques d'érosion interne et de claquage hydraulique,
- garantir la stabilité d'ensemble de la digue à court terme et long terme jusqu'à 40 ans,

- tenir compte des contraintes d’emprises et des réseaux enterrés sur le tracé de la digue,
- tenir compte de la géologie du site, composée notamment d’une épaisseur significative de 8 à 11 m d’argiles vasardes très compressibles.

Cette phase de conception a duré toute l’année 2020 en étroite collaboration avec les services d’EDF, permettant de construire en 2021/2022, une digue de protection contre les inondations et les franchissements par vagues de 2,4 km de long, comportant un écran étanche en fondation et fondée sur un total de 98 km d’inclusions rigides et protégée par 80 000 tonnes d’enrochements.

Mots-clés

inondation, franchissement, érosion, chaux, inclusions

Abstract

Since its construction, the Blayais Nuclear Power Plant (CNPE) has been protected from external flooding by marine submersion by a system composed of two parts: a first on the Gironde river front and a second surrounding the site and closing the inlets of water by the surrounding marshes. This second part is the subject of this communication. As a result of national and international experience feedback (global warming, storms Martin, Katrina, Xynthia and the Fukushima tsunami), all of this protection required reassessments of the level of protection in order to take into account the combination of rare phenomena: Astronomical Highest Tide, millennial occurrence surge, fixed increase in sea level, centennial wind, unfavorable wave direction and, in provision, a fixed increase to cover the evolution of sea level linked to the climate change. These reassessments led to design a new protection to control the different water inflows (overtopping, percolation, leaks) in accordance with the recommendations of guide 13 of the Nuclear Safety Authority (ASN) and to limit the volume of water on the protected platform. ARTELIA, VINCI Construction Terrassement and MENARD, in a consortium, proposed an original and innovative compromise for a levee composed of lime-treated materials on rigid inclusions, riprap and waterproof screen to guarantee the stability of the structures over a period of 40 years and adapt to the complexity of the site (geology and footprint). In very limited areas where the construction of a classic embankment levee is not possible, a dike solution consisting of a Reinforced Earth wall (central side) and an embankment with riprap protection (marsh side).

These solutions are the best compromise found in the face of the various constraints and generated challenges to be met during the studies to demonstrate the robustness of the structure, such as:

- Limit overtopping by wave,
- Guarantee the watertightness of the structure and limit the leak volumes through the levees and their foundation and through,
- Eliminate the risks of internal erosion and hydraulic uplift,
- Guarantee the short-term and long-term stability of the levee until 40 years,
- Take into account the constraints of the construction area and buried networks,
- Take into account the specific geology of the site, composed of a significant thickness of 8 to 11 m of highly compressible mud clay.

This design study was carried out in 2020 in close collaboration with EDF services, and led to the construction of the project in 2021/2022. It results in a 2.4 km long of levee against flooding and wave overtopping including a waterproof screen, founded on a total of 98 km of rigid inclusions and protected by 80,000 tons of rockfill.

Key Words

Flood, overtopping, erosion, lime, inclusions

Les digues de la presqu'île d'Ambès, une réhabilitation
dans un contexte fortement évolutif
*Ambès peninsula protection levee, a rehabilitation projet
within a highly evolutive context*

O. Clave¹, B. Cortier¹, L. Le², S. Delattre², S. Burlon², P. Kerlan³

¹ Setec Hydratec, Paris, France, odile.clave@setec.com

² Terrasol, Paris, France, silvia.delattre@setec.com

³ Bordeaux Métropole, Bordeaux, France, p.kerlan@bordeaux-metropole.fr

Résumé

La presqu'île d'Ambès, située à la confluence de la Garonne et de la Dordogne est protégée des aléas fluvio-maritimes par une digue de ceinture constituant le système d'endiguement. Ces digues de taille modeste, (environ 1 m) sont soumises à une combinaison de comportements évolutifs, qui complexifient les projets de confortement et la définition de leur niveau de protection. La presqu'île, et donc la fondation des digues, est en effet constituée d'argile vasarde très déformable et compressible, formées par les dépôts alluvionnaires récents de la presqu'île. Ce matériau engendre des phénomènes de tassement récurrent dès lors que des rechargements de sol sont mis en oeuvre. Elles sont également soumises aux sollicitations cycliques de la marée, qui engendrent des déplacements progressifs vers la rivière (reptation) et des phénomènes d'érosion interne. Par ailleurs, les différentes sollicitations hydrauliques et hydro-sédimentaires créent également des phénomènes d'érosion et de recul de la berge. Enfin, le changement climatique contribue progressivement à réhausser les niveaux marins et ainsi progressivement à diminuer le niveau de protection de ces ouvrages.

L'article présente dans un premier temps les ouvrages concernés et ces différents éléments de contexte. Puis l'article détaille le travail de diagnostic effectué, basé sur les observations de terrains, investigations, analyses, essais laboratoires. Les différents phénomènes à l'œuvre sont listés et caractérisés. L'impact de ces phénomènes est quantifié quand cela est possible. La compréhension des phénomènes géotechnique à l'œuvre dans les matériaux de berge et de fondations des ouvrages sous le chargement cyclique des marées fait l'objet d'un développement particulier et introduit le concept de reptation à l'œuvre sur le site : des analyses numériques ont en effet été menées en simulant les effets de cycles de marée selon une approche de modélisation permettant un couplage hydro-mécanique complet.

Enfin, les conséquences sur les solutions de confortement et les techniques mises en oeuvre pour la réhabilitation des ouvrages seront présentées, selon 2 axes : (i) la proposition d'une recharge progressive des rives soumises au marnage par piégeage des sédiments et colonisation par des espèces végétales adaptées, pour lutter contre l'érosion et valoriser les milieux écologiques de l'estran ; (ii) La recherche de solutions économes en ressources et adaptatives, afin de faciliter leur évolution future tout en assurant la stabilité et la sûreté des ouvrages selon les règles de l'art.

Mots-clés

digue, estuaire, érosion, tassements, réhabilitation

Abstract

The Ambès peninsula is located at the Garonne et Dordogne river confluence, close to Bordeaux. It is protected from river and maritime hazard by a levee all along the banks. These levees are of a moderate size (1 m high) but they endorse a combination of evolving behaviors that makes the rehabilitation projects and the protection level definition quite complex.

The peninsula, and therefore the levee foundation, is made up of a very compressible and deformable muddy clay formed by recent alluvial deposits. This material causes important and recurring settlements when backfill or structure are implemented. The cyclic loading due to the tide, also creates progressives' displacements towards the river (reptation), and internal erosion. Furthermore, the various hydraulic and hydro-sedimentary stresses also create erosion phenomena and recession of the bank. Finally, climate change is gradually contributing to raising sea levels and thus gradually reducing the level of protection of these structures.

The article first presents the site, the levee system concerned, and these different context elements. Then, it details the diagnosis that was carried out based on field observations, investigations, analyses, and laboratory tests. The different phenomena at work are listed, characterized. The impact of these phenomena is quantified when possible. The understanding of the geotechnical phenomena at work in the bank and foundations materials under the cyclical loading of the tides is the subject of particular development and introduces the concept of creeping (or reptation) at work on the site: numerical analyzes were in fact carried out by simulating the effects of tidal cycles using a modeling approach allowing complete hydro-mechanical coupling.

Finally, consequences for the possible rehabilitation strategies and the techniques that are implemented for the levee rehabilitation are presented.

- Nature based solution for the bank restauration: progressive recharge of the banks subject to tidal flow by trapping of sediments and colonization by adapted plant species to limit erosion, enlarge the banks and enhance the ecological environments of the foreshore;
- Solutions that limit resource consumption and GES emission;
- Adaptative solution to facilitate their future development while ensuring the stability and safety of the structures according to the rules of the art.

Key Words

levee, estuary, erosion, settlements, rehabilitation

Digue Maritime d'Yves *Yves Coastal levee*

A. Plastre¹

¹ France Maccaferri, Valence, France, a.plastre@maccaferri.com

Résumé

L'article s'intéresse aux travaux de protection contre la submersion marine sur les communes d'Yves et de Châtelailon Plage (17), au niveau du village des Boucholeurs qui se sont déroulés entre 2021 et 2022.

Ce projet de défense de la côte a été établi en décembre 2011 dans le cadre du programme de prévention des inondations (PAPI) de la baie d'Yves, à la suite des dégâts induits par la tempête Xynthia. Il s'agit d'un chantier de protection du littoral dans une zone écologique riche et protégée, où les techniques les moins impactantes pour le milieu ont été privilégiées. La digue de retrait est destinée à protéger les communes d'Yves et de Châtelailon Plage, mais également les infrastructures à proximité (RD 137 et voie ferrée), d'un événement exceptionnel de type Xynthia.

Le département de la Charente Maritime, en qualité de maître d'ouvrage a confié la maîtrise d'œuvre à UNIMA et les travaux ont été réalisés par un groupement d'entreprises Vinci Terrassement Construction, Equo Vivo, Suez Consulting, Biotec, WSP et Trézence TP à l'issue d'un marché attribué après un dialogue compétitif.

Plusieurs techniques de protection anti-érosion ont été mises en place, pour protéger d'un événement de période de retour de type Xynthia. La digue s'étend sur 3 200 m et a été découpée en 11 tronçons ayant un profil géométrique et/ou une sollicitation hydraulique différents. La modélisation hydraulique a permis de définir des hauteurs d'agitation variables entre 30 cm et 1,25 m. Afin d'optimiser la solution technique, le groupement titulaire du marché s'est appuyé sur la compétence de France Maccaferri dans les techniques de protection anti-érosion pour définir 4 principes de protection de digue, de résistance graduelle. De la plus douce à la plus robuste des solutions, la digue a été respectivement protégée par recouvrement de terre végétale engazonnée, par géomatelas anti-érosif agrippant la terre végétale, par gabions matelas de type Reno Plus et enfin par des enrochements. Très souvent utilisée en milieu fluvial, la technique gabions a été sélectionnée par le groupement d'entreprises sur plus de 30 % du linéaire de la protection en raison de son excellente intégration dans le site et de l'utilisation de matériaux présentant une innocuité environnementale.

Mots-clés

digue maritime, Xynthia, gabion matelas, géomatelas, enrochements

Abstract

The article focuses on the protection works against coastal submersion, which took place between 2021 and 2022, in the municipalities of Yves and Châtelailon Plage (France, Charente-Maritime department), more precisely at the village of Boucholeurs.

This coastal defense project was established in December 2011 as part of the Yves Bay flood prevention program, in response to the damage caused by the storm Xynthia. This is a coastal protection work in a rich and protected ecological zone, where techniques with the lowest impact on the environment at short and long terms have been selected. The setback levee is intended to protect the municipalities of Yves and Châtelailon Plage but also the nearby infrastructure (RD 137 and railway line) from an exceptional Xynthia-type event.

The department of Charente-Maritime, as project owner, entrusted the project management to UNIMA and the works were carried out by a consortium of companies Vinci Terrassement Construction, Equo Vivo, Suez Consulting, Biotec, WSP and Trézence TP at the end of a contract awarded after a competitive dialogue.

Several anti-erosion protection techniques have been put in place to protect against a Xynthia-type return period event. The levee extends over 3 200 m and has been divided into 11 sections with a different geometric profile and/or hydraulic stress. The hydraulic modeling allowed to define the wave action, varying from 30 cm to 1m²⁵. In order to optimize the technical solution, the main contractor relied on the expertise of France Maccaferri in erosion control solutions to define 4 principles of levee protection of gradual resistance. From the softest to the most robust of solutions, the levee was protected by covering with grassed topsoil, by erosion control geomats gripping the topsoil, by Reno Plus type gabion mattresses and finally by riprap protection. Widely used in river protections, the gabion technique was selected by the main contractor on more than 30% of the levee due to its excellent integration into the site and the use of materials presenting environmental harmlessness.

Key Words

coastal levee, Xynthia, gabion mattress, geomat, riprap

Index des auteurs

Alléon C.	121, 173	Cachot B.	201
Allies A.	99	Calissano H.	177
Alquier M.	91	Cambefort C.	185
Aubriet J.	143	Canac R.	115
Aymard N.	223	Caro E.	91
Ayssami D.	117	Carpentier N.	155
Azemard P.	153	Carvajal C.	149, 191
Bancal X.	81	Castagnet A.	39, 41
Barde-Cabusson S.	163	Cau J.	53, 219
Bastid L.	183	Cebron F.	183
Batilliot L.	177	Chabrat N.	141
Béguin R.	105, 107	Chaloux E.	219
Ben Yusef A.	167	Chambon A.	81
Benahmed N.	109	Chancel C.	115, 223
Bendahmane F.	137	Chaouch N.	113, 125, 143, 153
Bennabi A.	109, 121	Chapier J.	77
Benot R.	173	Chapuis H.	105
Berche V.	169, 171, 173, 175, 177	Chardes S.	41
Bernard A.	85	Chareyre B.	159
Bertola F.	143	Chazelle G.	63
Beullac B.	31, 47, 103, 165, 191, 213	Chene C.	65
Billaudeau S.	85	Chevalier C.	117, 123, 153, 213
Bisson J.	95	Clarimont S.	25
Bizien C.	169, 171	Clave O.	55, 225
Body J.-L.	69	Clouet M.	203
Bonelli S.	113, 119, 125, 139, 143, 163, 197	Cochet P.	197
Bonnafé A.	75	Coll C.	223
Bontemps A.	193	Collomb T.	79
Borsellino F.	99	Cortier B.	55, 225
Bosch D.	221	Courivaud J.-R.	139, 151
Boucher M.	107	Couturier G.	215
Bouchet P.	79	Crampette F.	125
Boudet L.	89	Crapoulet A.	203
Boussafir Y.	95, 117, 127, 169, 213	Creusot C.	183
Bridoux B.	107, 123, 147	Criado D.	91
Brousset F.	223	Criscione S.	219
Broust P.	37, 45	Cuisinier O.	141
Brulé C.	95	Curt C.	31, 165
Brune A.	27, 185	D'Urso G.	157
Brunet C.	223	Dano C.	159
Bufalo M.	175, 215	Darbot M.	87, 129
Burgat J.	113	Darnaud A.	39
Burlon S.	225	Darthos A.	25
Burtin P.	223	Dast C.	39, 41
Byron F.	125, 143	De Backer G.	121
		De Beukelaer-Dossche M.	59

De Paris C.	51	Guirado F.	95
Debien G.	209	Hachet G.	157
Degrémont I.	25	Hathout M.	149
Del Gatto L.	139	Havot Broekarts J.	61
Delattre S.	225	Hemmati S.	117
Delbec M.	219	Henry E.	189
Delemasure J.V.	23	Henry J.	69
Deniaud Y.	47, 111, 213	Hosseini-Sadrabadi H.	159
Dezert T.	151	Hoyaux C.	219
Di Maiolo P.	31, 165	Huard S.	89
Diab Y.	149	Issart N.	41
Dieudonné S.	61	Jacqueline D.	119
Doghmane A.	125, 143	Jarmasson L.	39
Donnadieu L.	169	Journé L.	31
Dreyfus R.	43	Jung J.-N.	155
Dufour N.	169, 177	Kaboré A.	189
Dumas M.	129	Kaidi S.	121
Dumas Y.	183	Kanel C.	63
Durand E.	107, 111, 123, 147	Kerfontain S.	167
Dutailly N.	223	Kerlan P.	155, 225
Eglin Y.	53	Khan U.T.	191
El Kadi Abderrezzak K.	139	Klotz F.	143
Elasmar H.	167	Kodieh A.	135
EOche J.	155	Koulinski V.	69, 185
Fanelli S.	169	Kuate F.	199
Fargier Y.	151	Kullolli B.	131
Fauchard C.	121	Kuss D.	69, 133
Fayel L.	79	Labiste Y.	99
Fellag R.	105	Laugier P.	55, 217
Fiquet-Albin F.	207	Launay T.	161
Fouquet M.	133	Laurent T.	79
Frezet J.F.	99, 203	Lavaud E.	97
Fuchs V.	87, 129	Le Bars S.	161
Gallala A.	131	Le Davadic J.	71
Galvain C.	199	Le Kouby A.	205
Gaspari V.	29, 61	Le L.	225
Gateau D.	33	Ledoux B.	183
Gelet R.	135, 137	Ledoux P.	27, 91
Gervais L.	205	Lelieux J.	219
Ghorbani A.	163	Lemaire J.	181
Girolami L.	113, 163	Leseur F.	23
Golay F.	125	Liency N.	35
Gracia-Lavedrine E.	45	Lino M.	197
Grand V.	19	Lucari T.	23
Gratier de Saint Louis M.	131	Lutzwiller N.	199
Grémeaux Y.	125, 143	Machin J.-C.	167
Grimaldi C.	89	Mainguenaud F.	191
Groell G.	207	Mallet T.	39, 41, 51, 153, 187
Grognet M.	203	Manicacci T.	51, 153
Grosjean V.	75	Marmiroli B.	21
Guilmin E.	77	Marot D.	135, 137

Martinez W.....	67	Plastre A.	227
Masroui F.	141	Platz V.	37, 45
Masset J.-P.....	193	Poggio J.....	43
Matéo F.	51, 187	Polje J.M.....	215
Matias L.	25	Ponen S.....	219
Mattras R.....	175	Ponsard L.....	89
Matynia A.	95	Potié G.	171, 173
Maurin J.....	19	Poupardin A.	109
Mazoyer A.	53, 183	Priolet O.	181
Mehenni A.	173	Prost A.S.	63
Mercadier D.....	95, 157, 173	Prost M.-H.	207
Merlo A.	69	Puiatti D.	197
Meyjonade F.	183	Quanguin A.....	211
Mezières G.	21	Quefféléan Y.	133
Michaud A.	53	Queste O.	169, 171, 175, 177
Milleret D.	69	Raccasi G.	89
Misset C.	133	Rahmani O.	23
Morris M.	139	Rainaldi J.....	207
Munoz O.	221	Reiffsteck P.	117, 169
Murru O.	171	Remy E.	57, 201
Navarro C.	181	Renaudineau B.	67
Nédélec Y.	155	Revil A.	163
Nénert B.	223	Rey E.	45
Nerincx N.	59, 121	Reynier O.	77
Nguyen N.-S.	135	Ribon M.	201
Nicaise S.	109, 119, 125, 143, 153	Richert P.	67
Nicoleau F.	73, 75, 113	Riegel P.	159
Noblet T.	71	Rielland P.-A.	99
Nollet S.	59	Riot N.....	217
Nuel J.L.	63, 183	Rosin-Corre N.	67
Nuti G.	185	Roux I.....	91
Oli B.	137	Roux S.	91
Ozturk T.....	143	Rouzier Y.....	223
Paillart M.....	23	Salmi A.	57, 201, 221
Palisse J.	133	Salvan L.....	43
Palix S.	217	Sauron O.	53
Palma-Lopes S.	151, 153	Saussaye L. 95, 107, 123, 127, 147, 173, 205, 213	
Patouillard S. 19, 47, 93, 95, 107, 111, 123, 127, 205, 209, 213		Savatier J.	53
Paya E.	91	Sergent P.	121
Peeters P.....	59, 121	Serna V.	21
Pepe Y.	19	Sharma J.	191
Pepin N.	185	Sibille L.....	159
Perrin J.....	37	Simonis J.....	203
Peteuil C.	91	Smaoui H.	121
Peyras L.	149, 153, 165, 191	Soulat P.....	73, 75
Philippe P.....	29, 109	Staal S.	91
Picault C.....	105, 125, 139	Szymkiewicz F.	169
Pichoff F.....	131	Tachker P.	223
Pigeot L.....	177	Talhouarn M.	57
Pinhas M.....	69	Talon A.	31

Tardieu A.	85	Vaudelet P.	163
Thierry T.	39	Vautrin D.	157
Tigoulet A.	223	Vercruysse J.	59
Tourlonnias B.	37, 45	Verdeil D.	69
Tourment R.	47, 103, 165, 213	Vergniault C.	151, 157
Trenkmann R.	193	Vernier S.	57
Trilla M.	65	Vesin M.	199
Trouillard C.	93, 111	Villemagne G.	85
Uguen C.	29	Volcy S.	159
Vaillant P.	53	Vuillermet E.	65
Valdeyron G.	155	Vuillet M.	149
Valenziano A.	189, 217	Wytttenbach S.	199
Valois R.	113	Youssef S.	109
Van Bockstal P.	59	Zanetti C.	35
Vanwarreghem J.	211	Zentner I.	157
Varillon J.	223	Zoccarato F.	185

ORGANISATEUR



INRAE

PARTENAIRES



Cfbr
comité français
des **barrages**
et **réservoirs**



FRANCE
DIGUES
ASSOCIATION NATIONALE
DES GESTIONNAIRES
DE DIGUES



Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

PARTENAIRES POUR LA VISITE D'OUVRAGES



Smavd
DURANCE



Syndicat Mixte Interrégional
d'Aménagement
SYMADREM
des Dignes du Delta
du Rhône et de la Mer

AVEC LE SOUTIEN DE



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES**
*Liberté
Égalité
Fraternité*