



**HAL**  
open science

## Sécurisation des digues du Rhône entre Beaucaire et Arles : conception hydraulique du système et des digues résistantes à la surverse

T. Mallet, A. Salmi, P. Billy, J.B. Faure, P. Mériaux, M. Provansal

### ► To cite this version:

T. Mallet, A. Salmi, P. Billy, J.B. Faure, P. Mériaux, et al.. Sécurisation des digues du Rhône entre Beaucaire et Arles : conception hydraulique du système et des digues résistantes à la surverse. 2ème Colloque National Digue Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions (DIGUES 2013), Jun 2013, Aix-en-Provence, France. pp.640-649. hal-01544813

**HAL Id: hal-01544813**

**<https://hal.science/hal-01544813>**

Submitted on 22 Jun 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **Sécurisation des digues du Rhône entre Beaucaire et Arles : conception hydraulique du système et des digues résistantes à la surverse**

## *Securing Rhône levees between Beaucaire and Arles : Hydraulic design of the system and spillways*

**Thibaut MALLET<sup>1</sup>, Akim SALMI<sup>2</sup>, Pascal BILLY<sup>3</sup>, Jean Baptiste FAURE<sup>4</sup>, Patrice MERIAUX<sup>5</sup>,  
Mireille PROVANSAL<sup>6</sup>**

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

<sup>2</sup> ISL Montpellier, CASTELNAU-LE-LEZ, [salmi@isl.fr](mailto:salmi@isl.fr)

<sup>3</sup> DREAL Rhône Alpes, LYON, [pascal.billy@developpement-durable.gouv.fr](mailto:pascal.billy@developpement-durable.gouv.fr)

<sup>4</sup> IRSTEA, LYON, [jean-baptiste.faure@irstea.fr](mailto:jean-baptiste.faure@irstea.fr)

<sup>5</sup> IRSTEA, AIX-EN-PROVENCE, [patrice.meriaux@irstea.fr](mailto:patrice.meriaux@irstea.fr)

<sup>6</sup> CEREGE, AIX-EN-PROVENCE, [provansal@cerege.fr](mailto:provansal@cerege.fr)

### **Résumé**

Le système de protection contre les crues du Rhône en aval de Beaucaire (Gard) a été réalisé après les grandes crues de 1840 et 1856. Il est ancien et présente une exposition très forte au risque de brèches. Suite aux inondations, causées par la crue du Rhône de décembre 2003, qui ont touché plus de 12 000 personnes sur l'ensemble du delta et occasionné plus de 700 millions d'euros de dommages, les pouvoirs publics ont engagé un vaste plan de lutte contre les inondations, intitulé « Plan Rhône », dont la stratégie générale en aval de Beaucaire peut être résumée ainsi :

- ✓ Éviter les ruptures de digues jusqu'à la crue millénaire du Rhône,
- ✓ Assurer une protection élevée pour les secteurs les plus sensibles,
- ✓ Ajuster le niveau de protection entre les rives droite et gauche du Rhône,
- ✓ Gérer le comportement du système pour les crues comprises entre la crue de protection (centennale) et la crue de sûreté (millénaire).

A partir de ces objectifs, le SYMADREM, exploitant de la majeure partie des digues dans le Delta du Rhône, a établi un programme de sécurisation des ouvrages de protection contre les crues du Rhône, qui comprend notamment la réalisation entre Beaucaire et Arles, de 10 km de digues résistantes à la surverse. La présente communication se concentre sur la conception hydraulique du système d'endiguement (objectifs de protection et de sécurité, principes des aménagements, choix de l'état initial, qualification de l'impact hydraulique, choix de la revanche). L'impact des ouvrages sur la zone protégée est également présenté. Dans une deuxième partie,

la conception hydraulique des sections renforcées aux déversements est évoquée.

### **Abstract**

The system of protection against flooding of the Rhône downstream of Beaucaire (Gard) was performed after the great floods of 1840 and 1856. It is old and has a very high exposure to the risk of breaches. Following the floods caused by the flooding of the Rhône in December 2003, which affected more than 12,000 people across the delta and caused more than 700 million euros in casualties, the State has launched a plan against floods "Plan Rhône", whose strategy downstream of Beaucaire can be summarized as follows :

- ✓ Avoid levees failures until a thousand year flood of the Rhone,
- ✓ Ensure a high level of protection for sensitive areas,
- ✓ Adjust the level of protection between the right and left banks of the Rhone,
- ✓ Organize securised overflows for floods between protection level (hundred year) and safety level (thousand year).

From these objectives, SYMADREM, manager of major river levees and sea dike in the Rhone delta, has established a program to secure structures against floods of the Rhone, which includes carrying between Arles and Beaucaire of 10 km of levees resistant to overflow.

This paper focuses on the design of hydraulic system (protection and safety levels, principles of structures, choice of the initial reference, qualification of hydraulic impact, choice of freeboard). The impact of the works on the

protected area is also presented. In the second part, the hydraulic design of the spillway is discussed.

## Introduction

Le Delta du Rhône, soumis au risque des inondations du Rhône et de la Mer est protégé par environ 225 km de digues fluviales et 50 km de digues maritimes. Les zones protégées par ce dispositif couvrent une superficie cumulée de 1600 km<sup>2</sup>; 110 000 personnes y résident (hors période estivale). Le système d'endiguement a été réalisé après les grandes crues de 1840 et 1856. Il est ancien, ne dispose pas de déversoirs de sécurité et présente une forte exposition au risque de brèches constatée lors des crues de 1993, 1994, 2002 et 2003.

Suite aux inondations, causées par la crue du Rhône des 3 et 4 décembre 2003 de période de retour centennale, qui ont touché plus de 12 000 personnes sur l'ensemble du delta et occasionné plus de 700 millions d'euros de dommages dans le Delta du Rhône, les pouvoirs publics ont engagé un vaste plan de lutte contre les inondations, intitulé « Plan Rhône ».

La stratégie générale du volet inondations du Plan Rhône, établie par l'Etat et intégrée en 2009 dans le schéma de gestion des inondations sur le Rhône aval, peut être résumée ainsi [1]:

- ✓ Eviter les ruptures de digues,
- ✓ Assurer une protection élevée pour les secteurs les plus sensibles,
- ✓ Ajuster le niveau de protection entre Beaucaire et Arles en fonction du débit capable dans la traversée d'Arles,
- ✓ Sur le Petit et Grand Rhône, ajuster le niveau de protection pour limiter au maximum les risques de rupture et tendre vers une protection centennale au droit des agglomérations et si possible pour la majorité des secteurs d'habitat diffus,
- ✓ Gérer le comportement du système pour les crues comprises entre le débit de protection et la crue millénaire: c'est-à-dire organiser le devenir des débits excédentaires sans risque de rupture de digue et en assurant le ressuyage rapide des terres inondées.

Faisant suite à la sollicitation du Préfet coordonnateur de bassin, le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Digues du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM), exploitant d'une grande partie des ouvrages (230 des 275 km) s'est porté maître d'ouvrage de l'ensemble des actions du Plan Rhône, identifiées sur son périmètre de compétences.

Cette maîtrise d'ouvrage s'est traduite en 2010 par l'établissement d'un programme de sécurisation des ouvrages de protection contre les crues du Rhône depuis le barrage de Vallabrègues jusqu'à la Mer Méditerranée.

La présente communication se concentre sur le tronçon du Rhône compris entre Beaucaire et Arles et plus particulièrement sur la conception hydraulique générale du système et celle détaillée des tronçons de digue renforcés au déversement.

## Ouvrages de protection et zones protégées

Les digues entre Beaucaire et Arles sont de classe A suivant [2]. Ils protègent deux grandes zones inondables :

- ✓ La rive droite du Rhône et du Petit Rhône, d'une superficie de 560 km<sup>2</sup>. Elle couvre 11 communes et concerne 45 000 personnes (hors période estivale) ;
- ✓ La rive gauche du Rhône et du Grand Rhône, d'une superficie de 340 km<sup>2</sup>. Elle couvre 16 communes et concerne 52 000 personnes (hors période estivale).

La typologie des ouvrages situés sur la ligne de défense contre les crues est très hétérogène. On y recense des ouvrages en terre, des ouvrages maçonnés, murs de quais, murs de soutènement, rideaux de palplanches ou remblai.

La fonctionnalité première de ces ouvrages est également très différente. Les ouvrages gérés par le SYMADREM sont dédiés à la protection contre les crues, mais on recense également un remblai ferroviaire (géré par RFF), des écluses (VNF), des remblais portuaires (CNR) et une prise d'eau sur le Rhône (BRL). Cette multiplicité de gestionnaires rend très complexe la gestion du système en crues.

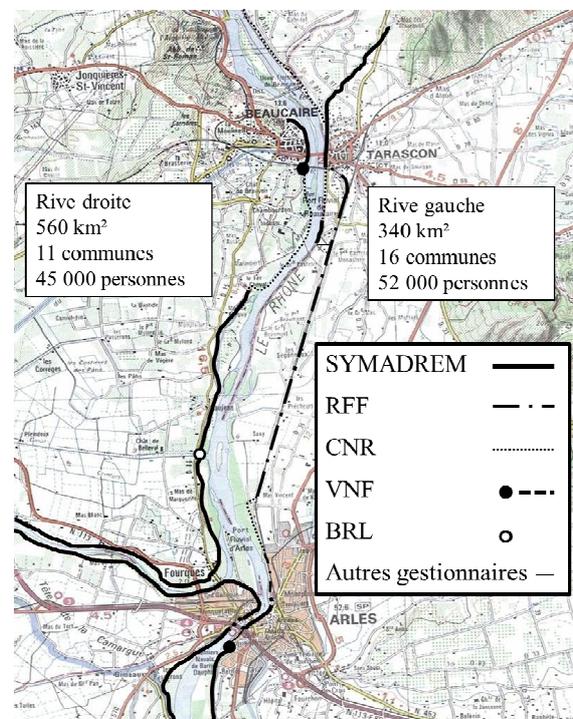


FIGURE 1: OUVRAGES HYDRAULIQUES ET GESTIONNAIRES ENTRE BEUCAIRE ET ARLES

### Le verrou hydraulique constitué par la traversée d'Arles

La traversée d'Arles, située juste en aval de la diffluent du Rhône est caractérisée par un rétrécissement « brusque » du lit majeur actif<sup>1</sup>, qui passe d'une largeur de 2 km à une largeur nulle et du lit mineur, qui passe d'une largeur de 400 à 150 mètres. Ce rétrécissement se caractérise par une forte pente hydraulique (0,2 %) sur 300 mètres, contre 0,03 % en amont et 0,01 % en aval. Les vitesses en crues sont supérieures à 4 m/s.

Ce goulet d'étranglement constitue une « section de contrôle » qui a pour effet de limiter, pour les fortes crues, le débit en traversée d'Arles et de provoquer des débordements en amont.

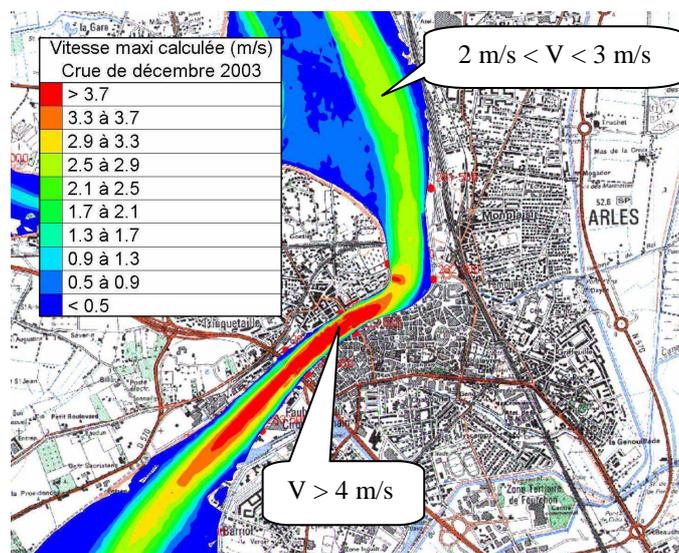


FIGURE 2: VITESSE DES ECOULEMENTS EN CRUE DANS LA TRAVERSEE D'ARLES [3]

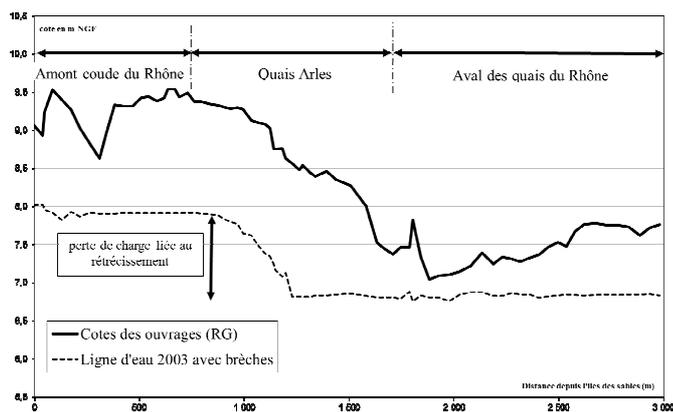


FIGURE 3: LIGNE D'EAU EN CRUE EN TRAVERSEE D'ARLES [3]

<sup>1</sup> Partie de lit majeur située dans le lit endigué, par opposition au lit majeur inactif situé dans la zone protégée

### Objectifs du schéma de gestion des inondations sur le Rhône aval

Le schéma de gestion des inondations sur le Rhône aval [1], établi par la DREAL Rhône Alpes, qui a la compétence pour le bassin du Rhône, a fixé les objectifs de protection, les objectifs de sécurité, ainsi que le principe des ouvrages à réaliser, qui est l'aménagement de :

- ✓ Tronçons de digue calés sans revanche, renforcés pour résister au déversement (dénommé par la suite digue résistante à la surverse),
- ✓ Tronçons de digues non renforcés au déversement, calés avec revanche.

La réalisation d'ouvrages mobiles ou fusibles, qu'ils soient passifs ou actifs, a été écartée pour privilégier des ouvrages passifs à cote fixe.

L'objectif de protection sur le Rhône a été défini comme l'absence de déversement pour une crue type décembre 2003 sans brèche dans le système (période de retour  $\cong$  100 ans). Pour les crues déversantes, le principe de répartition équitable (50/50) des volumes déversés entre les rives droite et gauche du Rhône a été retenu comme un objectif de conception du système.

L'objectif de sécurité a été défini comme l'absence de rupture<sup>2</sup> jusqu'à la crue millénaire du Rhône. La valeur de la revanche n'a pas été déterminée dans le schéma de gestion.

Le maintien à la cote identique des ouvrages maçonnés (moyennant traitement localisé des points bas) en traversée d'Arles, Beaucaire et Tarascon a également été une donnée d'entrée du schéma de gestion.

### Conception hydraulique du système

A partir de ces objectifs, le Symadrem a établi un programme de sécurisation, qui s'étend du barrage de Vallabrègues jusqu'à la mer [4]. Il comprend :

- ✓ des digues résistantes à la surverse calées à une cote, dite cote de protection définie ci-après, (linéaire  $\cong$  25 km),
- ✓ des digues dites « millénales », non prévues pour résister à la surverse, calées 50 cm au-dessus de la cote de sûreté définie ci-après (linéaire  $\cong$  195 km),
- ✓ des digues de protection rapprochée, au droit des zones à enjeux sensibles.

Ce programme, dont le montant est estimé à 400 millions d'euros (182 millions d'euros sont d'ores et déjà

<sup>2</sup> Synonyme de brèches dans la présente communication

contractualisés dans le Contrat de Projets Interrégional Etat Régions Plan Rhône 2007/2013), comprend des confortements de digues existantes et des déplacements d'ouvrage en recul des berges sur les secteurs présentant des contraintes morphodynamiques ou comportant des enjeux environnementaux importants

La conception hydraulique et géotechnique du système repose sur trois cotes, correspondant respectivement à trois intensités de crue :

- ✓ **La cote de protection**, correspond sur le Rhône entre Beaucaire et Arles, au niveau d'eau atteint pour une crue type décembre 2003 sans brèche, dont le débit de pointe est estimé à  $11\,500\text{ m}^3/\text{s} \pm 5\%$  à la station de Beaucaire/Tarascon et dont la période de retour est d'environ 100 ans [5].
- ✓ **La cote de sûreté ou de projet**. Elle correspond au niveau d'eau atteint par la crue exceptionnelle du Rhône, dont le débit de pointe est estimé à  $14\,160\text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Beaucaire/Tarascon et la période de retour à 1000 ans [5]. A cette cote, les ouvrages à sécuriser doivent encore disposer d'une marge de sécurité suffisante pour que la probabilité de formation de brèche soit faible. L'ouvrage doit répondre à tous les standards de sécurité et de fonctionnalité, que ce soit sur le plan structural (résistance au cisaillement ou au glissement, résistance en fondation, résistance à l'érosion interne ou externe) ou sur le plan hydraulique (pas de débordement des coursiers, ouvrages de dissipation correctement dimensionnés).
- ✓ **La cote de danger**. Elle correspond à la cote de crête des digues dites « millénales », soit 50 cm au-dessus de la cote de sûreté. C'est la cote au-delà de laquelle l'ouvrage risque de subir des dégâts majeurs pouvant conduire rapidement à la rupture (probabilité de formation de brèche forte).

### **Construction du modèle hydraulique, calage et analyse de sensibilité**

Une étude hydraulique, destinée à caler les ouvrages entre Beaucaire et Arles, a été confiée à la CNR<sub>ingénierie</sub>.

Le modèle utilisé couvre le lit endigué (excepté l'aval Grand Rhône) depuis l'aval du barrage de Vallabrègues jusqu'à la mer. C'est un modèle 2D (code TELEMAC développé par EDF), qui permet, utilisé dans les règles de l'art, d'atteindre une précision relative inférieure à 2 cm. Il comporte 315 000 mailles de calcul et a été construit à partir d'un modèle numérique de terrain (lever topographique par LIDAR hélicoptère avec une précision en x,y,z de l'ordre 3 cm) et d'une bathymétrie très précis.

Le modèle, calé sur la crue de décembre 2003 à partir des 9 limnigrammes de la CNR et des laisses de crues levées par

la DREAL, la CNR et RFF, a une précision absolue estimée à 10 cm dans le lit mineur, 20 cm en traversée d'Arles, et 30 cm dans le lit majeur, soit l'ordre de précision des mesures.

En outre, une analyse de sensibilité a été menée sur les paramètres suivants :

- ✓ Variation de  $\pm 5\%$  sur le débit de calage  $\rightarrow \pm 20\text{ cm}$  sur les niveaux calculés ;
- ✓ Variation de  $\pm 5$  points sur les coefficients de rugosité dans le lit mineur  $\rightarrow \pm 40\text{ cm}$  sur les niveaux calculés ;
- ✓ Variation de la bathymétrie entre 2002 et 2007  $\rightarrow$  jusqu'à  $+ 15\text{ cm}$  sur les niveaux calculés (en traversée d'Arles).

Elle montre la consistance hydraulique de la modélisation et valide l'utilisation du modèle pour différents scénarios de crues.

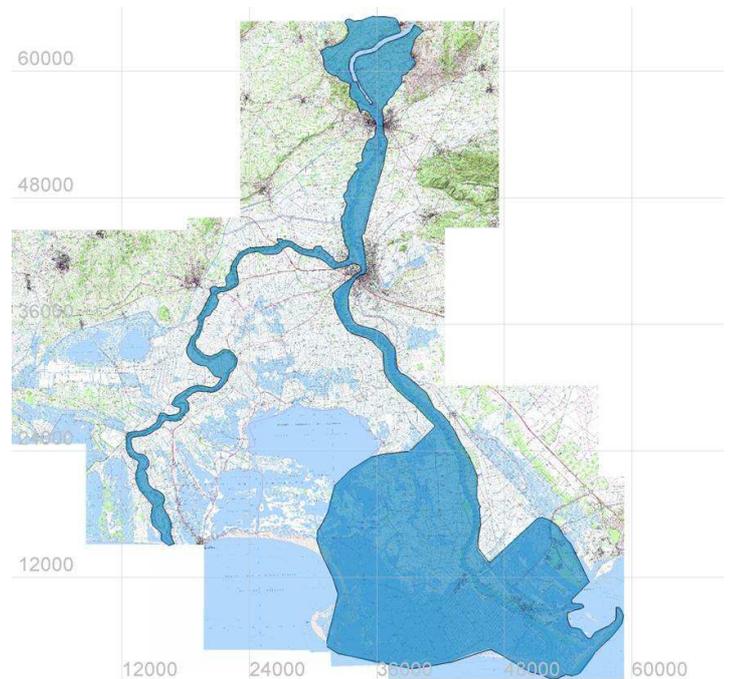


FIGURE 4: ETENDUE DU MODELE ETUDE DE CALAGE PRECIS [3]

### **Calage des digues entre Beaucaire et Arles**

Les différentes étapes du calage ont été les suivantes :

- ✓ Identification des points bas en traversée d'Arles, de Beaucaire et Tarascon,
- ✓ Détermination du niveau maximum en traversée d'Arles pour la crue millénaire (détermination de la revanche entre la cote de danger et la cote de sûreté),
- ✓ Calage des digues résistantes à la surverse de façon à :
- ✓ Eviter tout débordement entre Beaucaire et Arles pour la cote de protection,
- ✓ Assurer, au-delà, une répartition égale des volumes déversés entre les deux rives du Rhône,

- ✓ Limiter le niveau en traversée d'Arles pour la crue millénale au niveau maximum acceptable (cote de sûreté de l'ouvrage),
- ✓ Garantir l'absence d'incidences en amont jusqu'à la crue millénale (traversée de Beaucaire/Tarascon et aval du barrage de Vallabrègues).

Ces objectifs ont impliqué de :

- ✓ Caler, à une cote dite millénale, les ouvrages situés en amont et en aval de ces tronçons résistant à la surverse afin d'éviter tout risque de contournement,
- ✓ de vérifier que la revanche au droit des ouvrages maçonnés, dont la cote ne pouvait pas être modifiée, était suffisante.

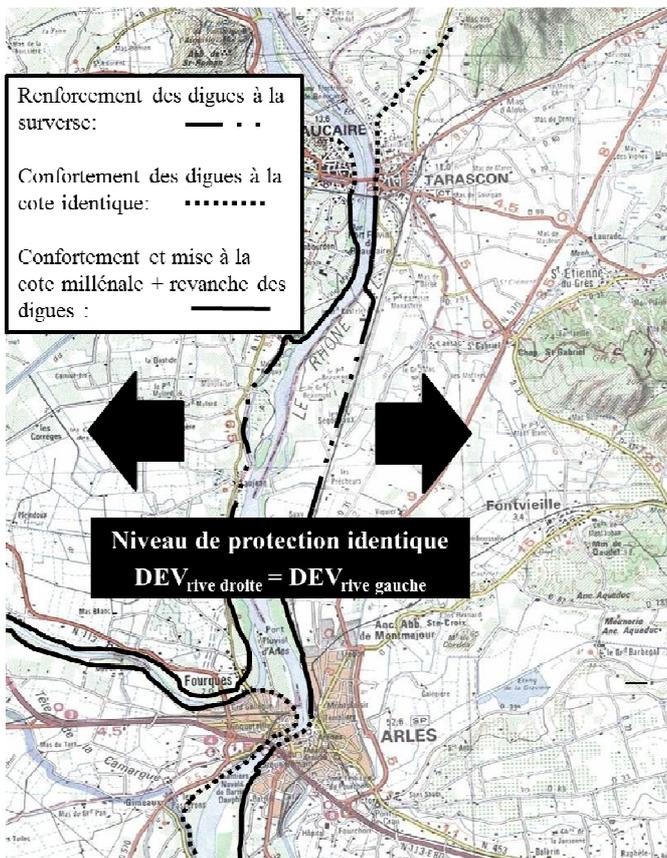


FIGURE 5: CALAGE ET TYPOLOGIE DES DIGUES ENTRE BEAUCAIRE ET ARLES

**Détermination du niveau maximum acceptable en traversée d'Arles (choix de la revanche)**

Une revanche forfaitaire de 50 cm (pouvant être réduite à 40 cm très localement) a été retenue pour la détermination du niveau maximum acceptable en traversée d'Arles [3].

Elle permet de faire face aux incertitudes suivantes<sup>3</sup> :

- ✓ Incertitude de **30 cm** liée aux caractéristiques hydrologiques et hydrauliques du système, permettant de faire face à :
  - ✓ la durée des événements futurs (crue plus ou moins rapide),
  - ✓ l'évolution incertaine des conditions d'écoulement (augmentation sensible de la rugosité)
  - ✓ l'évolution incertaine de la bathymétrie du Rhône (engravement ou incision du plancher alluvial du Rhône).
- ✓ Incertitude liée à la modélisation numérique, dont la précision absolue est estimée à **20 cm**. En traversée d'Arles, la ligne d'eau est particulièrement « chahutée », du fait de :
  - ✓ la présence d'un coude prononcé – effet 3D important,
  - ✓ un changement de section notable avec approfondissement important,
  - ✓ la présence de deux ponts (avec chacun deux piles dans le lit du fleuve).
- ✓ Les lignes d'eau calculées ont montré la difficulté de convergence numérique, malgré un maillage particulièrement raffiné en traversée d'Arles (maille de 15 m dans le sens longitudinal – 5 m dans le sens transversal)
- ✓ Incertitude de **35 cm**, liée à l'effet des vagues provoquées par le vent (vagues de 20 à 30 cm observées localement lors de la crue de décembre 2003).

**Définition de l'état initial (i.e. avant Plan Rhône)**

La vérification d'absence d'incidences du calage a nécessité la définition préalable par les services de l'Etat, d'un état initial à la fois pour le lit endigué et la zone protégée, à prendre en compte dans les modélisations. Il a été défini comme étant le suivant :

- ✓ « Niveau de protection défini par la géométrie actuelle des ouvrages/digues
- ✓ Au-delà de ce niveau de protection (donc pour les crues importantes), les surverses et les ruptures de digues interviennent au moment où la ligne d'eau [maximale] est atteinte »

Cette définition permet de considérer deux états théoriques de fonctionnement pendant la crue : un état de fonctionnement sans brèche jusqu'au pic de crue suivi d'un état de fonctionnement avec brèches.

Pour le lit endigué, la formation de la brèche intervenant au moment du pic de crue, le calcul des lignes d'eau correspond

<sup>3</sup> Suivant la formule de propagation des incertitudes, l'incertitude générale correspondant à *n* incertitudes indépendantes est la somme quadratique des *n* incertitudes)

à une modélisation hydraulique avec déversement sans brèche.

Pour le lit protégé, la modélisation est sans brèche jusqu'à la pointe de crue et avec brèches à partir de la pointe de crue.

Cette définition de l'état initial, qui reste théorique, compte tenu de la complexité du fonctionnement hydraulique du système d'endiguement, permet d'avoir dans le lit endigué des hypothèses sécuritaires pour le calcul des lignes d'eau. La prise en compte des brèches dans le lit protégé permet également d'avoir le scénario le plus défavorable, mais également le plus probable dans l'état actuel. L'hypothèse de démarrage de la brèche, qu'elle soit avant, au moment des premiers déversements ou à la pointe de crue, a très peu d'incidences, pour le calcul des volumes déversés, compte tenu de l'importance des entrées d'eau en décrue.

**Détermination des impacts hydrauliques résultant des aménagements : scénarios de crues et qualification de l'impact**

Les études d'impact hydraulique ont été réalisées sur la base de 5 scénarios de crues. Pour les trois premiers scénarios qui correspondent à des événements observés depuis 1993, les marégrammes observés ont été retenus comme conditions limites aval. Pour la crue de référence, une translation du marégramme observé en 2003 a été opérée à 1,3 NGF, ce qui correspond à une période de retour de 100 ans avec une tendance moyenne de montée des eaux de 20 cm d'ici à 2050 [6]. La construction du scénario exceptionnel a été établi sur la base d'un marégramme constant correspondant à une surcote marine de période de retour 100 ans augmentée de 40 cm, correspondant à une tendance extrême sur la montée des eaux sur la même période [6].

TABLEAU 1: SCENARIOS DE CRUES CONSIDEREES

Type crue	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	Période de retour (années)	Niveau marin (m NGF)	Période retour (années)
Nov. 2002	9 500	25	0,95	50 ans
Janv. 1994	10 500	50	0,8	5 ans
Déc. 2003	11 500	100	1,0	50 ans
Mai 1856 (référence)	12 500	250	1,3	100 ans + 20 cm
Exceptionnelle	14 160	1000	1,5	100 ans + 40 cm

TABLEAU 2: QUALIFICATION DE L'IMPACT HYDRAULIQUE

Exhaussement ou abaissement de la ligne d'eau	Qualification de l'impact
✓0	Impact nul
✓0 à 2 cm	Impact quasiment nul

	(limite de précision du modèle)
✓ 2 à 5 cm	Impact notable
✓ 5 à 10 cm	
✓ 10 à 15 cm	
✓ Supérieur à 15 cm	

Pour la qualification de l'impact hydraulique, les classes du Tableau 2 ont été retenues.

**Calage des digues et analyse de sensibilité**

Le calage a porté sur trois paramètres :

- ✓ L'implantation
- ✓ La longueur de déversement
- ✓ La cote de protection (variation centimétrique autour de l'objectif de protection prédéterminé)

Il a également fait l'objet d'une analyse de sensibilité des paramètres suivants : coefficient de débit, influence du niveau marin, gradient de crue.

Le dimensionnement des longueurs de déversements a fait l'objet de plusieurs tests. En définitive, le critère déterminant, pour le dimensionnement des longueurs, a été l'absence d'impact hydraulique notable en amont et en aval, ce qui a porté le choix sur cinq km de déversement contrôlé sur chaque rive.

L'impact nul ou quasiment nul en tous points du système, étant requis par l'Etat (police de l'eau) jusqu'à la crue de référence (mai 1856) en application du SDAGE, le dimensionnement de mesures compensatoires hydrauliques comprenant le décaissement de 450 000 m<sup>3</sup> de matériaux en aval du barrage de Vallabrègues, le dragage de 600 000 m<sup>3</sup> en aval de Tarascon et création d'une île de 600 000 m<sup>3</sup> entre Tarascon et Arles, a été nécessaire pour à la fois respecter l'objectif de protection fixé par l'Etat [1] et la nécessité de garantir l'absence d'impact en amont.

L'impact nul ou quasiment nul pour la crue millénaire a été retenu uniquement au droit des zones à enjeux forts (barrage CNR de Vallabrègues, zone inondée en aléa modéré).

L'évaluation des déversements latéraux et du coefficient de débit associé a constitué une étape particulièrement sensible du calage des digues. La CNR<sup>ingénierie</sup> [3] a utilisé la formule de Dominguez. D'après Dominguez ([7], la débitance d'un seuil latéral peut être estimée par la formule suivante :

$$Q = \varphi_1 . m . L . h_1 \sqrt{2 . g . h_1}$$

Avec :

- $Q$  : débit déversé (en m<sup>3</sup>/s)
- $\varphi_1$  : coefficient de « Dominguez » (fct du rapport  $h_0/h_1$ )
- $m$  : coefficient de débit (fct de la charge et forme de crête)
- $h_1$  : lame d'eau déversante en aval du déversoir (en m)
- $h_0$  : lame d'eau déversante en amont du déversoir (en m)
- $L$  : longueur de déversement (en m)

L'application de la formule de Dominguez à la configuration étudiée donne :

Écoulement en régime fluvial :  $h_0 \approx h_1$  et  $\varphi_1 = 1$   
 $m$  variant entre 0,273 et 0,325 avec :

- ✓ charge considérée d'environ 20 à 50 cm ;
- ✓ déversoirs à crête épaisse et arrondie ou à arêtes vives.

Par ailleurs, la CNR a réalisé différents modèles physiques portant sur cette problématique, dont une étude sur modèle du déversoir latéral du canal de fuite de l'aménagement de la chute de Vallabregues (Laboratoire d'Hydraulique de Gerland – 1968).



FIGURE 6 : DEVERSOIR LATERAL DU CANAL DE FUITE DE L'AMENAGEMENT DE LA CHUTE DE VALLABREGUES

D'après cette étude, le coefficient  $m$  varie selon la lame d'eau déversante :

- $m = 0,25$  pour  $h = 20$  cm
- $m = 0,27$  pour  $h = 30$  cm
- $m = 0,35$  pour  $h = 40$  cm
- $m = 0,36$  pour  $h = 50$  cm

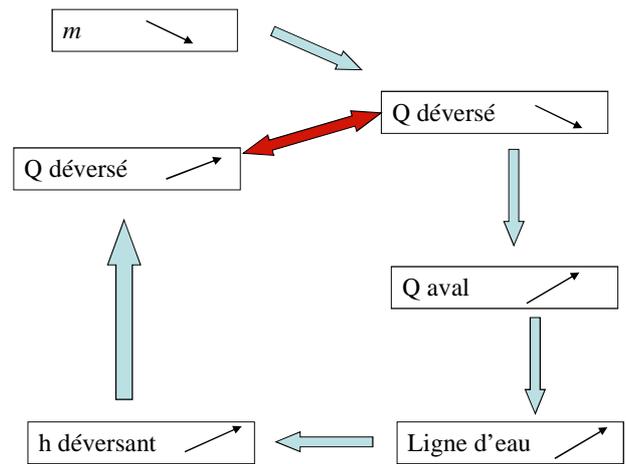


FIGURE 7 : AUTO-REGULATION DES DEBITS DEVERSES [3]

Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celle estimée par Dominguez. Ce déversoir latéral (Cf. figure 6 présentant des caractéristiques similaires à celles des tronçons résistants à la surverse à dimensionner, (largeur et forme de la crête, direction de l'écoulement par rapport à l'axe du déversoir), la CNR<sub>ingénierie</sub> a utilisé les valeurs du coefficient  $m$  évalué par l'étude sur modèle physique pour le dimensionnement des tronçons résistants à la surverse, avec une lame déversante moyenne de :

- ✓ environ 20 cm pour le scénario crue de référence, soit un coefficient  $m = 0,25$  ;
- ✓ environ 30 cm pour le scénario crue exceptionnelle, soit un coefficient  $m = 0,27$ .

Des tests de sensibilité ont été réalisés pour la crue de sûreté et pour un coefficient de débit successivement pris égal à [0,21 ; 0,27 ; 0,33] (variation de  $\pm 20$  % autour de la valeur « nominale »). L'impact d'une sous ou sur-estimation du coefficient de débit de seuil latéral de 20 % se traduit respectivement par :

- ✓ un exhaussement ou abaissement du niveau calculé, en moyenne de 1 à 3 cm dans l'ensemble du secteur impacté
- ✓ une diminution ou augmentation des débits et volumes déversés de 10 % environ pour le scénario crue exceptionnelle.

Le système est ainsi peu sensible au coefficient de débit considéré, qui s'explique par la présence la « section de contrôle » que représente la traversée d'Arles. Le schéma ci-dessous illustre de manière simplifiée « l'auto-régulation » des débits déversés / niveaux calculés suite à une dégradation de la débitance des tronçons déversants.

**La conclusion de la CNR<sub>ingénierie</sub> sur le calage des tronçons résistants à la surverse est qu'il s'avère robuste et peu sensible au coefficient de débit considéré et donc en définitif aux hypothèses de l'ingénieur.**

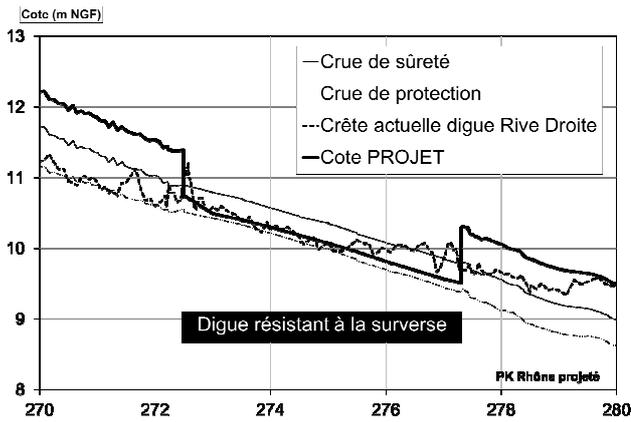


FIGURE 8 : CALAGE ACTUEL ET PROJETE DES OUVRAGES

Par ailleurs, on notera que l'application de la formule de Hager figurant dans le guide sur les déversoirs de sécurité [10] permet de retrouver des coefficients de débits latéraux similaires à ceux utilisés par la CNR.

La différence de niveaux entre les sections résistantes à la surverse et les sections non prévues pour résister à la surverse est de 80 cm (30 cm de lame d'eau déversante entre les crues de protection et de sûreté et 50 cm de revanche).

### Conception hydraulique des digues résistantes à la surverse

Le diagnostic approfondi et la conception des ouvrages en rive droite, ainsi que la réalisation d'une étude de dangers et une analyse coût-bénéfice, ont été confiés au bureau d'étude ISL. Différentes solutions envisagées pour le renforcement au déversement ont été étudiées, avec pour exigence d'intégrer les ouvrages dans le paysage :

La solution retenue par le SYMADREM a été la réalisation d'une carapace en enrochements bétonnés avec végétalisation de la protection. La figure 9 illustre le schéma de principe des ouvrages.

Le dimensionnement hydraulique a été fait à l'aide d'un modèle local permettant d'estimer pour la crue de sûreté les paramètres suivants :

- ✓ L'évolution de la lame d'eau aval en fonction de la lame d'eau déversante ;
- ✓ La vitesse maximum en pied de talus ;
- ✓ La longueur maximum du ressaut
- ✓ La hauteur d'eau conjuguée.

Le comportement des ouvrages pour la crue de danger a également été vérifié.

Les débits spécifiques  $q$  et les vitesses maximales  $V$  calculés sur l'ouvrage déversant, sont respectivement pour :

- ✓ la crue de sûreté :  $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s.m}$  et  $V = 4,6 \text{ m/s}$

- ✓ la crue de danger :  $q = 0,86 \text{ m}^3/\text{s.m}$  et  $V = 6,9 \text{ m/s}$

TABLEAU 3: SOLUTIONS ENVISAGEES DE DEVERSEMENT [8]

Solution envisagée	Commentaires
Engazonnement	La sécurité au déversement ne peut être assurée compte tenu du temps de déversement. Résistance variable suivant la saison
Béton armé	Solution techniquement sûre
Blocs en béton préfabriqués	Peu adaptée du point de vue esthétique
Gabions en marches d'escaliers et inclinés (type matelas reno)	Solution techniquement sûre Pb de pérennité et de vandalisme Peut être végétalisée et s'intégrer dans le paysage
Enrochements libres	Solution sûre si bien dimensionnée Peut être végétalisée et s'intégrer dans le paysage
Enrochements bétonnés	Solution sûre Peut être végétalisée et s'intégrer dans le paysage Moins souple (tassement) que la solution enrochements libres.

Un coefficient de Strickler  $K=40$  a été retenue pour le calcul des hauteurs. Le dimensionnement des protections a été estimé à partir des formules de Knauss et Pinto [9].

#### Formule de Knauss

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot (\Delta \cdot D_{50})^3}} = 1,18 + 0,5\Phi - 1,87 \cdot \sin \alpha$$

Avec

- $q$  : débit spécifique
- $\Delta$  : densité relative déjaugée des enrochements (=1,5 pour  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ )
- $D_{50}$  : diamètre médian des enrochements
- $\Phi$  : coefficient de compacité (0,60 pour des enrochements déversés et 1,10 pour des enrochements appareillés (pelle à grappin ou manuellement))
- $\alpha$  : pente des talus

#### Formule de Pinto

$$D_{50} = 0,6 \cdot S^{0,43} \cdot q^{0,56}$$

Avec

- $D_{50}$  : diamètre des enrochements
- $q$  : débit spécifique
- $S$  : pente des talus



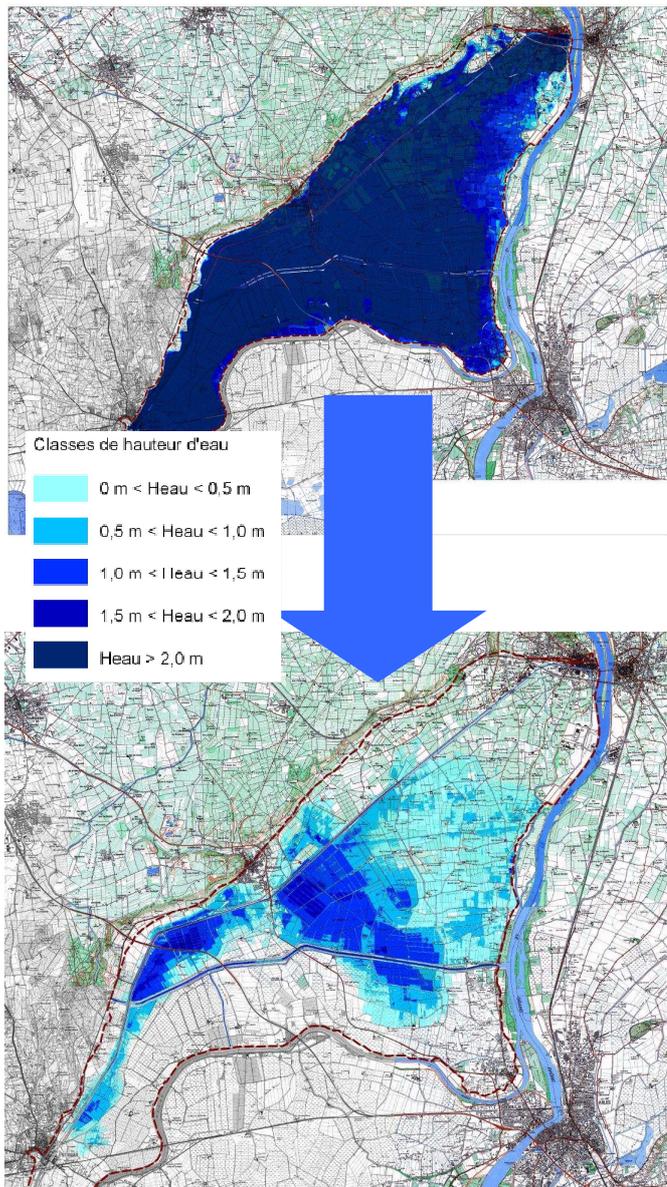


FIGURE 10 : IMPACT DES TRAVAUX DANS LA ZONE PROTEGEE POUR LA CRUE DE REFERENCE [8]

## Conclusion

La méthodologie présentée appliquée au Rhône de 2007 à 2009 a été étendue aux digues du Petit Rhône et du Grand Rhône en aval d'Arles pour aboutir à l'établissement du programme de sécurisation cité supra. Ce dernier a été

découpé en 12 opérations, dont 4 sont aujourd'hui terminés et 4 vont démarrer fin 2013 (dont le renforcement à la surverse de la digue entre Beaucaire et Fourques). Pour la réalisation du programme, des conventions de maîtrise d'ouvrage ont été passées avec RFF, la CNR, VNF et BRL afin d'avoir à moyen terme un exploitant unique pour ouvrages de protection contre les crues fluviales dans le Delta du Rhône

En rive gauche du Rhône, la présence d'un remblai ferroviaire a rendu la solution plus complexe. Un partenariat a été passé entre le SYMADREM et RFF pour la création d'une digue séparée de la voie ferrée, équipée d'une section résistante à la surverse (maîtrise d'ouvrage et exploitation Symadrem) et la réalisation de 10 ouvrages traversants pour assurer la transparence hydraulique des crues déversantes jusqu'à la crue de sûreté (maîtrise d'ouvrage et exploitation RFF). Le démarrage des travaux est prévu en 2015.

## Références

- [1] DREAL Rhône Alpes (2009) *Schéma de Gestion des Inondations du Rhône Aval*
- [2] Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques
- [3] SYMADREM (2009 et 2012) *Etude de calage précis entre Beaucaire et Arles – rapports de phase 1 à 5 et prestations supplémentaires – CNR*
- [4] SYMADREM (2010) *Programme de sécurisation des ouvrages de protection contre les crues du Rhône du Barrage de Vallabrègues à la Mer*
- [5] Institution Interdépartementale des Bassins Rhône-Saône/Territoire Rhône (2003) : *Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône (EGR) – Volet 1 : hydrologie - SAFEGE CETIIS*
- [6] ULMANN A. (2008) *Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques. Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille I. Discipline : Géographie – Option : Climatologie - CEREGE*
- [7] CARLIER M. (1998) *Hydraulique générale et appliquée Editions EYROLLES*
- [8] SYMADREM (2010). *Étude de renforcement de la digue entre Beaucaire et Fourques – ISL*
- [9] CETMEF/CUR/CIRIA (2009) : *Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques – version française du Rock Manual*
- [10] Degoutte G. coord. (2012). *Les déversoirs sur les digues fluviales. MEDDE-DGPR*